



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,
ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

INFRASONIDO Y RUIDO DE BAJA FRECUENCIA EN
AEROGENERADORES

Raúl Marina García

Tutor: Ricardo San Martín Murugarren

Pamplona, noviembre 2011

1. OBJETO DEL PFC	5
1.1 Descripción del PFC	5
1.2 Estructura del PFC	6
2. INTRODUCCIÓN AL RUIDO DE BAJA FRECUENCIA E INFRASONIDOS.....	8
2.1 Infrasonido y ruido de baja frecuencia	8
2.1.1 Umbrales de audición y dolor	8
2.1.2 Efectos	10
2.1.3 Índices para su evaluación	11
2.2 Ruido de aerogeneradores	13
2.2.1 El factor humano ante el ruido procedente de aerogeneradores.....	14
2.2.2 Procedimiento de medida.....	16
2.2.3 Resultados publicados hasta la fecha	19
3. CALIDAD SONORA EN AEROGENERADORES	23
3.1 Características de los infrasonidos.....	23
3.1.1 Introducción	23
3.1.2 Ponderaciones	23
3.1.3 Umbrales	24
3.2 Niveles de infrasonidos producidos por aerogeneradores.....	25
3.3 Características audibles de aerogeneradores	26
3.4 Características psicoacústicas de importancia en la molestia producida por el ruido de aerogeneradores.....	31
3.4.1 Sonoridad.....	31
3.4.2 Fuerza de fluctuación	36
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	40
4.1. Entorno físico	40
4.2 Procedimiento de Medida.....	45
4.2.1 - Posición de medida acústica	45
4.2.2 Posiciones de medida de velocidad y de dirección de viento	46
4.2.3 Medidas acústicas	48
4.2.4 Medidas no Acústicas	48
4.3 Descripción de la medida.....	49
4.4 Configuración de la medida	52
5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	56

5.1 Especificaciones técnicas del equipo de medida	56
5.2 Especificaciones técnicas de los aerogeneradores	70
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	73
6.1 Parámetros acústicos	73
6.1.1 Dependencia del viento	73
6.1.1 Dependencia del viento	73
6.1.2 Espectro.....	77
6.1.3 FFT.....	86
6.1.4 Percepción de infrasonidos y ruido de baja frecuencia.....	91
6.1.5 Potencia sonora aparente.....	93
6.2 Parámetros psicoacústicos.....	100
7. CONCLUSIONES	103
8. BIBLIOGRAFÍA.....	107
8.1 Referencias	107
8.2 Links.....	109
ANEXO A. Caracterización del paravientos secundario.....	111

1. OBJETO DEL PFC

1. OBJETO DEL PFC

Determinar la presencia o ausencia de ruido de baja frecuencia e infrasonido en el ruido procedente de aerogeneradores de última generación, incluyendo el diseño de un método de medida y análisis apropiado. Estudiar la posible aplicación de índices psicoacústicos para su evaluación.

1.1 Descripción del PFC

Existe en la actualidad cierta preocupación sobre los efectos adversos que el ruido de baja frecuencia (incluso por debajo del rango audible) procedente de aerogeneradores podría estar provocando en personas cuyas viviendas están situadas en las cercanías de parques eólicos. El debate en torno a su presencia, nivel y posibles efectos se ha abordado en diversos estudios, de mayor o menor rigor científico, obteniéndose resultados contradictorios.

Se ha llevado a cabo una búsqueda de estudios relativos a los efectos adversos sobre las personas, tanto psicológicos como fisiológicos, producidos por el ruido de baja frecuencia en aerogeneradores. La evaluación se ha realizado en base a criterios de rigor científico por medio de búsquedas en bases de datos de revistas de reconocido prestigio.

Con el fin de evaluar si existe un problema, se ha determinado el nivel de infrasonido y sonido de baja frecuencia presente en las cercanías de dos parques eólicos para determinar su efecto potencial. En este sentido, se han realizado una campaña de medidas abarcando distintas máquinas y velocidades de viento.

La fase de valoración de resultados comprende el análisis de las medidas realizadas utilizando tanto parámetros acústicos (niveles sonoros, FFT, CPB...) como psicoacústicos (Sonoridad, Rugosidad, Fuerza de Fluctuación...). En base a los primeros se ha realizado una búsqueda de información sobre la procedencia de los distintos sonidos (turbulencias, giro de pala...). La utilización de parámetros psicoacústicos, relacionados con la percepción auditiva del ser humano, ha aportado información sobre la sensación de molestia que produce un determinado ruido en el ser humano.

1.2 Estructura del PFC

- Estudio de la bibliografía existente al respecto.
- Diseño y puesta a punto del dispositivo experimental.
 - Configuración de plataforma Pulse.
- Obtención de grabaciones monoaurales y binaurales.
 - Elección del “Caso de estudio”.
 - Grabación en campo.
 - Obtención de las señales necesarias para realizar las auralizaciones.
- Análisis de los resultados obtenidos.
- Conclusiones
- Elaboración de memoria final.

2. INTRODUCCIÓN AL RUIDO DE BAJA FRECUENCIA E INFRASONIDOS

2. INTRODUCCIÓN AL RUIDO DE BAJA FRECUENCIA E INFRASONIDOS

2.1 Infrasonido y ruido de baja frecuencia

El *ruido de baja frecuencia* (Low Frequency Noise, *LFN*) se define habitualmente como aquél sonido no deseado cuyas principales componentes se sitúan en el rango de 20 a 100 Hz. Es, por tanto, un sonido audible por el ser humano, cuyo rango de audición suele estar comprendido entre 16 Hz y 20 kHz.

Por debajo de los 15 Hz, sin embargo, existe un cambio en la percepción de la variación de presión sonora, estando ésta ligada más a una “sensación” o “presencia” [1] que a una “escucha” propiamente dicha. Aquellas ondas sonoras cuya frecuencia se sitúa por debajo del rango audible se consideran infrasonidos.

Tanto el *ruido de baja frecuencia* como el *infrasonido* pueden producir diferentes efectos en las personas. Sin embargo, los puntos de corte para los rangos de frecuencia establecidos son en la práctica difusos (además de que dependen tanto de cada individuo como del propio nivel sonoro) [2], y muchos de los efectos tradicionalmente ligados al infrasonido pueden deberse realmente al ruido de baja frecuencia en la región de los 20 a 100 Hz, ya que es habitual que ambos se manifiesten conjuntamente en nuestra vida diaria¹.

2.1.1 Umbrales de audición y dolor

La norma ISO 226 [3] ofrece las curvas de igual sonoridad² incluyendo los umbrales de audición desde los 20 Hz hasta los 12.5 kHz. Con respecto a las frecuencias más bajas, el trabajo de Watanabe y Moller [4] es habitualmente referenciado. En él se presentan unos umbrales de 107 dB a 4 Hz, 97 dB a 10 Hz y 79 dB a 20 Hz, dato este último que prácticamente coincide con el umbral de la ISO 226 para esa frecuencia.

¹ Sistemas de aire acondicionado, calentadores, aviones, y otros ruidos de origen natural como turbulencias, terremotos, etc., poseen un espectro que muestra un decrecimiento en nivel de presión sonora conforme la frecuencia aumenta

² Basadas en tonos puros y bajo condiciones de campo libre.

No obstante, los umbrales de audición son valores medios y la variación alrededor de este valor no es insignificante. Esto quiere decir que es habitual encontrar individuos con umbrales de audición que varían hasta 5 y 10 dB tanto por encima como por debajo de la media³. Además, los umbrales para ruidos de baja frecuencia complejos parecen estar algo por debajo que los correspondientes a tonos puros [5].

También es necesario resaltar que a bajas y particularmente a frecuencias infrasónicas, los contornos de igual sonoridad están mucho más próximos, por lo que para un cambio dado en nivel de presión sonora (incremento o decremento), el cambio en sonoridad es mayor a bajas frecuencias que el mismo cambio de nivel a altas frecuencias. Por ejemplo, la diferencia entre las curvas de 20 y 80 fonios es de 60 dB a 1 kHz pero de sólo 15 dB a 8 Hz. Por tanto, las variaciones en la sonoridad percibida como resultado de variaciones de nivel serán considerablemente mayores que a altas frecuencias. Esto podría ser una explicación para que este tipo de sonidos suelen ser percibidos como más molestos.

Comparando con sonidos de alta frecuencia del mismo nivel, los niveles elevados de baja frecuencia tienen menor probabilidad de producir pérdidas auditivas. El umbral de dolor se sitúa alrededor de 135 dB a 50 Hz, 140 dB a 20 Hz y 162 dB a 2 Hz. Parece que el ruido de baja frecuencia puede producir un incremento temporal en el umbral de percepción tras una exposición corta e intensa, pero que la recuperación es rápida y completa. Sólo para exposiciones muy prolongadas a muy altos niveles se han descrito pérdidas auditivas permanentes [6].

Históricamente, los primeros trabajos sobre el ruido de baja frecuencia y sus efectos subjetivos fueron impulsados por el programa espacial estadounidense, una fuente de ruido de baja frecuencia de niveles muy altos. Los vehículos de lanzamiento producen la máxima energía de ruido en esta región frecuencial. Los experimentos se llevaron a cabo en cámaras construidas al efecto y se evaluó la tolerancia subjetiva a niveles muy altos, entre 140 y 150 dB, en el rango de frecuencias de hasta 100 Hz. Se concluyó que los sujetos, que tenían experiencia en exposición al ruido y en el uso de protección para

³ Una estimación aproximada es que alrededor del 2,5% de la población puede tener un umbral a baja frecuencia al menos 12 dB más sensible que el umbral medio, lo que corresponde a casi 1.000.000 de personas en el grupo de edad comprendido entre 50 y 59 años en los países de la UE. Este es el grupo más proclive a generar el mayor número de quejas [7].

los oídos, podían tolerar tanto el ruido de banda ancha como el ruido discreto en el rango de 1Hz a 100 Hz con niveles de presión sonora de hasta 150 dB. Trabajos posteriores sugieren que, para exposiciones de 24 horas, niveles de 120 a 130 dB son tolerables por debajo de 20Hz. Estos límites se han establecido para evitar daños fisiológicos directos. Es evidente que nadie sugiere que la exposición sea agradable, o incluso subjetivamente aceptable. Sin embargo, los niveles utilizados en estos experimentos son considerablemente superiores a los niveles de exposición de las personas en sus hogares derivados del medio ambiente, del tráfico, de la industria o de otras fuentes.

2.1.2 Efectos

El principal efecto en las personas debido a la presencia de infrasonidos y ruido de baja frecuencia es la molestia. Puede decirse que sus efectos son muy similares a aquellos producidos por el ruido de alta frecuencia, en el sentido de que todo sonido no deseado es potencialmente molesto. Sin embargo, a menudo se presentan también en forma de vibración, y sus fluctuaciones de nivel pueden agravar la sensación de molestia en comparación con ruidos de frecuencias mayores [7].

Se ha demostrado que infrasonidos y ruido de baja frecuencia procedentes de sistemas de aire acondicionado, motores diversos, compresores..., pueden causar somnolencia, fatiga y dolor de cabeza, posiblemente debido a la sobrecarga de procesamiento en la información recibida, pudiendo afectar al rendimiento laboral [8].

Asimismo, ante la presencia de ruido de baja frecuencia, se han observado respuestas fisiológicas como vasoconstricción y vasodilatación, variación del ritmo cardiaco y presión sistólica, cambios endocrinos, variaciones en los niveles de cortisol, y alteraciones del sistema nervioso central. Los datos sugieren que es improbable que cualquiera de estos efectos tenga gran importancia, salvo bajo exposiciones extremas [9].

Por otro lado, no se ha observado ningún efecto psicológico o de comportamiento ante exposiciones agudas a infrasonidos en humanos. Hay, sin embargo, pocas investigaciones de buena calidad, los datos son escasos y su interpretación es complicada debido a que los infrasonidos suelen ir acompañados de ruido de baja

frecuencia y otras frecuencias audibles. No se han investigado los efectos de exposiciones prolongadas a bajos niveles [10].

Por último, existe alguna evidencia de que la exposición a ruido de baja frecuencia genere disminución de sueño y sensación de cansancio, lo que puede resultar en una disminución del tiempo de respuesta ante determinados estímulos [11].

En la década de los 60 y 70, particularmente después de que algunos reportajes sensacionalistas “informaran” sobre la peligrosa naturaleza del infrasonido, se publicaron algunos estudios de escaso rigor científico que le atribuían efectos como tumores cerebrales, desangramiento interno y muerte súbita. Estos informes no han sido validados y todavía hoy son causa de desinformación [12].

Sin embargo, parece que el ruido de baja frecuencia provoca una angustia extrema a determinadas personas que son sensibles a sus efectos. Dicha sensibilidad puede ser el resultado de una mayor respuesta sensorial, en la totalidad o en parte del rango auditivo, o puede ser provocada por otros factores [13].

2.1.3 Índices para su evaluación

En la actualidad, existe consenso en la comunidad científica en lo relativo a que la molestia por el ruido de baja frecuencia representa un problema real que no se rige por los métodos de evaluación de uso común.

Los métodos convencionales de evaluación de la molestia, que normalmente se basan en el nivel equivalente ponderado A, son inadecuados para el ruido de baja frecuencia⁴ y pueden conducir a las autoridades reguladoras a tomar decisiones incorrectas.

En el caso particular de las turbinas eólicas, son consideradas como fuentes de ruido industrial y, como tal, se usan directrices basadas en conocimientos que provienen de

⁴ Existen gran número de mediciones de laboratorio de la molestia causada por el ruido de baja frecuencia, con diferentes espectros y niveles. Las comparaciones son complicadas pero una de las principales conclusiones suele ser que la molestia con respecto al ruido de baja frecuencia aumenta “demasiado” rápidamente con el nivel sonoro global.

situaciones bastante diferentes a las que habitualmente están ligadas a los aerogeneradores. Entornos rurales, palas en constante movimiento, un sonido cuyas características lo hacen más perceptible e incidencias imprevisibles, son ejemplos de factores que indican la necesidad de un método de evaluación fiable.

En particular, la ponderación A, que subestima los niveles de baja frecuencia, y otros métodos ligados a la acústica arquitectónica, como las curvas NC y NR, son claramente insuficientes.

Un indicador habitualmente aceptado y mencionado en el estándar de medida [14] para conocer si un determinado ruido puede ser caracterizado como poseedor de un alto componente en baja frecuencia es calcular la diferencia entre el ruido ponderado C y ponderado A, y ver si esa diferencia supera los 20 dB. Además, si la energía acústica se sitúa por debajo de los 20 Hz, es decir para evaluar la presencia de infrasonido, suele recomendarse el uso de la ponderación G según la norma ISO 7196 [15].

En la actualidad están surgiendo métodos de evaluación específicos para el ruido de baja frecuencia, pero la limitación con respecto a los aerogeneradores es que no dan una evaluación completa de las fluctuaciones. Es posible que la aplicación de conceptos de calidad sonora, en particular, la aspereza y la fuerza de fluctuación [16] marquen el camino a seguir.

2.2 Ruido de aerogeneradores

Los posibles efectos adversos para la salud debido a la exposición al ruido procedente de las turbinas eólicas se han analizado desde la primera generación de modernos aerogeneradores eléctricos que se erigieron en la década de los 70. A pesar de ello, se han llevado a cabo sólo unos pocos estudios epidemiológicos [17].

Por medio de encuestas, es habitual confrontar el bienestar con los niveles de presión sonora calculada con ponderación A en el exterior de la vivienda de cada entrevistado, permitiendo relacionar el impacto del ruido de los aerogeneradores con el confort de las personas que viven en las cercanías de las turbinas. El principal efecto adverso es siempre la molestia producida por el ruido, que lógicamente aumenta conforme se incrementan los niveles de presión sonora.

Una consecuencia es la perturbación del sueño. La proporción de los residentes que presentan este síntoma aumenta significativamente cuando se alcanzan niveles de sonido cercanos a los recomendados⁵ como máximos niveles aceptables para las nuevas instalaciones. Las dificultades para conciliar el sueño y/o el sueño interrumpido es una de las principales causas que generan estrés y demás patologías derivadas de éste.

Ante el ruido procedente de aerogeneradores, el porcentaje de encuestados que simplemente notan la presencia del ruido suele alcanzar el 25 % a niveles inferiores a 30 dBA, incrementándose hasta el 80% a niveles superiores, por encima de 35 dBA. Estos porcentajes son los mismos para los que obtienen beneficios económicos de la instalación de los parques en sus terrenos y el resto de encuestados.

El porcentaje de encuestados que están molestos por el ruido también se incrementa rápidamente cuando el nivel sonoro alcanza entre 40 y 45 dBA. Sin embargo, en este caso, los encuestados que obtienen beneficios económicos no perciben apenas molestia. Esto explica en parte la habitual disminución de las molestias a altos niveles sonoros generalmente presente en estos estudios⁶.

⁵ Generalmente regulados en normativas.

⁶ Por encima de 45 dBA, es decir, cerca de las turbinas eólicas, la mayoría de los encuestados suelen obtener beneficios económicos de su instalación.

Esta falta de molestia puede ser el resultado de varios factores: por ejemplo, los “beneficiarios” tienen una visión más positiva sobre los parques eólicos al obtener un beneficio real y poseer una sensación de “control” sobre las turbinas [18].

2.2.1 El factor humano ante el ruido procedente de aerogeneradores

El ruido es uno de los factores determinantes en la planificación de nuevos emplazamientos para parques eólicos o aerogeneradores individuales. Resulta evidente que existe una creciente preocupación por el impacto de los parques eólicos debida seguramente a los diversos informes de molestia producida por el ruido de los aerogeneradores entre las personas que viven cerca de los parques eólicos ya operativos. En la actualidad, por ejemplo, existe un enconado debate sobre si los sonidos de baja frecuencia e infrasonidos producidos por las turbinas eólicas contribuyen o no a la molestia percibida. Decidir si hay o no una cantidad sustancial de ruido de estas características (u otras que podrían confundirse como tal) en el ruido de las turbinas modernas se ha convertido en una difícil tarea para planificadores y autoridades.

Varios estudios sobre el impacto⁷ de los parques eólicos en los residentes cercanos a las zonas donde se implantan parques eólicos se citan habitualmente en el debate sobre los posibles efectos de salud que se lleva a cabo, por ejemplo, en Internet [19]. Sin embargo, pocos de estos estudios han sido publicados en revistas científicas. Es decir, no son críticamente revisados (“peer review”) y aceptados por los científicos, llegando en algunos casos a alcanzar la descalificación personal.

Es bastante probable que las objeciones basadas en ruido de baja frecuencia e infrasonidos, a menudo expresadas por plataformas contrarias al desarrollo de parques eólicos de última generación, hayan surgido en gran medida de la incomprensión de estos temas por el público en general, para quienes el problema se ha desarrollado a través de medios de comunicación y exageraciones periodísticas [20]. Resulta llamativo, en este sentido, que alguno de los científicos más criticados por este tipo de plataformas debido a su posicionamiento cree necesario “advertir a los grupos de objetores ya que

⁷ Con respecto a infrasonidos y ruido de baja frecuencia

podría ser que, malgastando sus energías en las objeciones a infrasonidos y a ruidos de baja frecuencia, además de estar perdiendo credibilidad, no están prestando suficiente atención a otros factores” [20].

Y es que diversos estudios han demostrado que el ruido de las turbinas eólicas podría ser molesto a niveles de presión sonora inferiores a los reconocidos como molestos para otras fuentes de ruido, como el tráfico rodado [21]. Las características especiales del ruido de los aerogeneradores (sobretudo en lo referente a las modulaciones de amplitud y su carácter “silbante”⁸) hacen que el sonido sea perceptible con mayor facilidad y molestia [22].

Esta creciente animadversión hacia los modernos aerogeneradores podría achacarse también a que las condiciones atmosféricas influyen más en las grandes turbinas de viento modernas que en las antiguas. Sin embargo, existen otros factores que también pueden contribuir en distinta medida. El mismo estudio [21] encontró por ejemplo que el predominio de la molestia en relación con los niveles de presión sonora, era mayor en zonas rurales que en zonas residenciales. Es decir, además de las diferencias en el ruido de fondo presente, la expectativa de las condiciones de vida de las personas también influye en el resultado.

Cuando se comparan los resultados de la relación estímulo-respuesta con otras fuentes de ruido estacionario, la sensación de molestia generada por el ruido procedente de aerogeneradores incrementa más rápidamente conforme aumenta el nivel de exposición (Figura 2.2.1) [21].

⁸ Un mayor nivel de ruido de fondo procedente del tráfico rodado reduce la probabilidad de notar el sonido de las turbinas, pero no tiene un efecto en la disminución de su molestia, debido a las diferencias espectrales entre ambos sonidos.

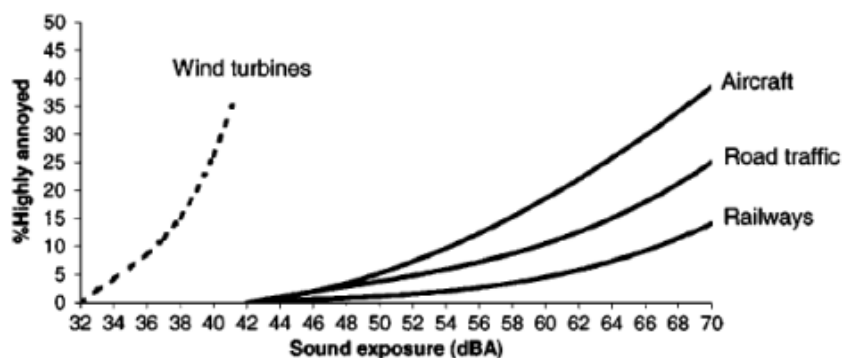


Figura 2.2.1: Porcentaje de personas altamente molestas con respecto al nivel de ruido procedente de diferentes fuentes (imagen extraída de referencia [21]).

De entre los posibles factores de moderación evaluados habitualmente, la actitud frente al impacto visual en el paisaje de las turbinas eólicas parece ser el más influyente, y otro porcentaje no desdeñable señala como factores que potencian los efectos adversos las vibraciones, el movimiento constante de las palas del rotor o la misma sombra que producen [18].

Sin embargo, por medio de entrevistas realizadas a personas residentes en las cercanías de parques eólicos se detectaron otras posibles causas no audibles ni estéticas. Así por ejemplo, el ruido de los aerogeneradores fue percibido por algunos de los encuestados como un “intruso en dominio privado”, es decir, algo que se ha introducido en su hogar “sin derecho”. La concepción de los encuestados del medio rural, ya sea como un lugar de paz y tranquilidad o como un lugar para el desarrollo y el crecimiento económico, parece influir en los efectos adversos del ruido.

2.2.2 Procedimiento de medida

En primer lugar, es interesante tener claro algunos aspectos de la naturaleza del ruido de los aerogeneradores actuales. En ellos aparecen dos tipos principales de ruido: ruido mecánico y ruido aerodinámico [23].

El ruido mecánico se genera principalmente por la multiplicadora, responsable de transformar la lenta rotación de las palas en una más rápida, pero también por otras partes del molino como el generador. El ruido mecánico tiene la energía sobre todo por debajo de 1 KHz, y puede contener tonos discretos. Estos tonos suelen resultar más

molestos que el ruido de espectro más amplio, pero tanto el ruido mecánico en general como dichos tonos en particular pueden reducirse eficazmente [24].

Por otro lado, el ruido aerodinámico de las turbinas de viento tiene un carácter de banda ancha. Surge como resultado del desplazamiento del aire por una pala y de las turbulencias en la superficie de ésta, por lo que los niveles de presión sonora aumentan con la velocidad punta. El ruido aerodinámico es el componente predominante en el ruido de aerogeneradores de hoy en día, ya que por un lado los fabricantes han sido capaces de reducir el ruido mecánico a un nivel inferior y, por otro, éste no aumenta con las dimensiones del aerogenerador tan rápidamente como el ruido aerodinámico [24].

Además, aunque no se haya demostrado que sea un factor importante que contribuya a la molestia, las turbinas eólicas producen sonidos de baja frecuencia. Una contribución importante a la parte de baja frecuencia del espectro del sonido puede ser el resultado de la variación repentina en el flujo de aire que la pala encuentra cuando pasa por la torre y la desviación en el ángulo de ataque del aire entrante.

Este efecto probablemente no se ha considerado importante ya que la frecuencia de paso de pala es del orden de 1 Hz⁹, donde el oído humano es muy poco sensible (región de infrasonidos). Sin embargo, este argumento oscurece un efecto relevante: la baja frecuencia de paso de pala modula sonidos de alta frecuencia que sí son audibles, creando un sonido periódico. El fenómeno se acentúa cuando la atmósfera se vuelve más estable, que es más habitual por la noche cuando hay un cielo parcialmente despejado y un viento moderado a nivel de suelo. En esta franja horaria se produce un cambio importante en el perfil del viento que afecta al funcionamiento de las grandes turbinas. El flujo alrededor de las palas disminuye con respecto al flujo óptimo, provocando una turbulencia inducida añadida – mayor cuando la pala pasa por la torre – y creando sonidos de corta duración a la velocidad de frecuencia de paso de pala [25].

Además, las mediciones han demostrado que la presencia de más turbinas dentro de un parque eólico y la posibilidad de sincronización entre las mismas pueden amplificar este fenómeno, produciendo un considerable aumento de la molestia [25]. Este hecho se

⁹ La mayor envergadura de los actuales aerogeneradores y su menor velocidad de rotación ha provocado que esta frecuencia de paso se desplace a rangos de frecuencia inferiores.

confirma por los residentes que viven cerca de las turbinas que suelen mencionar la misma observación común: a menudo por la tarde o por la noche el sonido de la turbina cambia a un modo más pulsante, a ritmo con la frecuencia de paso de pala. El alcance de este fenómeno, sin embargo, no ha sido ampliamente investigado, aunque hay indicaciones en la literatura que señalan que puede ser relevante, y más en las modernas turbinas de mayor tamaño.

Por tanto, los aerogeneradores emiten ruido en bajas frecuencias, pero también en frecuencias medias y altas. En consecuencia, el equipamiento debe ser especializado, ya que se precisan micrófonos de gran rango dinámico y sensibles a frecuencias muy bajas, al menos desde la frecuencia de paso de pala, dependiente del tamaño del aerogenerador.

Además, debido a que los aerogeneradores se suelen colocar en lugares con mucho viento, es habitual encontrarse en un entorno con niveles de ruido de fondo elevados, lo que dificulta la toma de medidas, sobretodo en lo relativo a infrasonidos y ruido de baja frecuencia. La falta de normativa de referencia agudiza el ingenio de los investigadores, como los pertenecientes al grupo de física aplicada de la Universidad de Oldenburg [26]. En su sistema de medida se utilizan dos micrófonos, los cuales se sitúan en dos agujeros separados 10 metros entre ellos, recubiertos por un material acústicamente transparente. Las medidas no son válidas para altas frecuencias. Se aplica la técnica de correlación cruzada para suprimir el ruido del viento, que no tiene correlación con los dos micrófonos y que dificulta la obtención del ruido del aerogenerador. Sin embargo, suele ser más habitual utilizar un único micrófono y utilizar la autocorrelación de la señal medida para minimizar en lo posible el efecto del ruido de fondo.

La normativa vigente que detalla las técnicas de medida de ruido acústico en aerogeneradores es la UNE-EN-61400-11 [14] y data del 2004. Su propósito es proporcionar una metodología común que asegure la consistencia y precisión en la medida y el análisis de las emisiones acústicas de los aerogeneradores. Sin embargo, respecto a los infrasonidos, ruidos de baja frecuencia, impulsividad y modulación de la amplitud, la norma dice que “se recomienda que se tomen medidas adicionales”, pero que éstas “no están aceptadas universalmente” y que ciertos aspectos relacionados “no son completamente entendidos en la actualidad”. Advierte, a modo de ejemplo, en su

Anexo A (únicamente informativo) que “se puede probar que medidas tomadas más alejadas del aerogenerador que las especificadas en la norma sean preferidas para la determinación de estas características”.

A grandes rasgos, el método de medida estandarizado consiste en obtener los niveles de potencia sonora, espectro y tonalidad a velocidades de viento comprendidas entre 6 y 10 m/s. Para las mediciones de viento, si es posible, se debe utilizar una torre, colocando en ella un anemómetro a 10 metros de altura.

Las medidas se realizan en puntos cercanos al aerogenerador, dependiendo de las dimensiones del mismo (normalmente a unos 100 metros). Esto es así para minimizar la influencia del terreno, las condiciones atmosféricas y el ruido inducido por el viento.

El micrófono se sitúa sobre una placa colocada sobre el suelo, para reducir el viento generado en el micrófono y para minimizar la influencia de diferentes tipos de suelo. Si se quiere medir infrasonidos, es recomendable colocar una doble protección contra el viento. Sin embargo, estas medidas no serán válidas para frecuencias altas.

2.2.3 Resultados publicados hasta la fecha

Debido a la escasa uniformidad tanto en el procedimiento experimental, derivada de la ambigüedad de la norma, como en los índices utilizados para evaluar el ruido de baja frecuencia e infrasonido procedente de aerogeneradores, resulta complicado comparar los resultados del conjunto de mediciones realizadas hasta la fecha y publicados por diferentes grupos de investigación.

Sí que existe uniformidad al indicar que las turbinas de diseño contemporáneo con un rotor que funciona en contra del viento, es decir, cuando el viento incide frontalmente sobre el rotor (configuración de barlovento¹⁰), generan infrasonidos muy débiles con un nivel muy por debajo del umbral de percepción, incluso a distancias bastante cortas, de varios cientos de metros. De las consideraciones sobre la propagación y transmisión de infrasonidos se concluye que el infrasonido procedente de tales turbinas podría

¹⁰ Configuración típica de los aerogeneradores actuales.

despreciarse cuando se evalúa el entorno de impacto de los aerogeneradores. Sin embargo, las turbinas con rotores a favor del viento, es decir, las que reciben el viento por la parte posterior del rotor (configuración de sotavento) producen niveles de infrasonidos de 10 a 30 dB más altos, y éstos pueden superar los criterios de evaluación pertinentes para las viviendas cercanas [27].

Cuándo se consideran distancias más largas, a partir de entre uno y dos kilómetros, es probable que ni las turbinas que funcionan a favor del viento ni las que lo hacen en contra, sean capaces de violar los criterios de evaluación de infrasonidos.

Respecto a las mediciones realizadas hasta la actualidad, cabe destacar la de investigadores japoneses [28] que realizaron la medición de los infrasonidos de un aerogenerador de 2 MW de potencia y 80 metros de diámetro de rotor. Las mediciones se tomaron a una distancia de 102 metros, obteniendo niveles de 82 dBG con velocidades de viento de 8 m/s.

En la Figura 2.2.2 se muestra la FFT realizada de una de las mediciones, donde se observa claramente la presencia de la frecuencia de paso de pala (1,05 Hz) y sus primeros armónicos con un claro aumento de nivel respecto del resto de frecuencias [28].

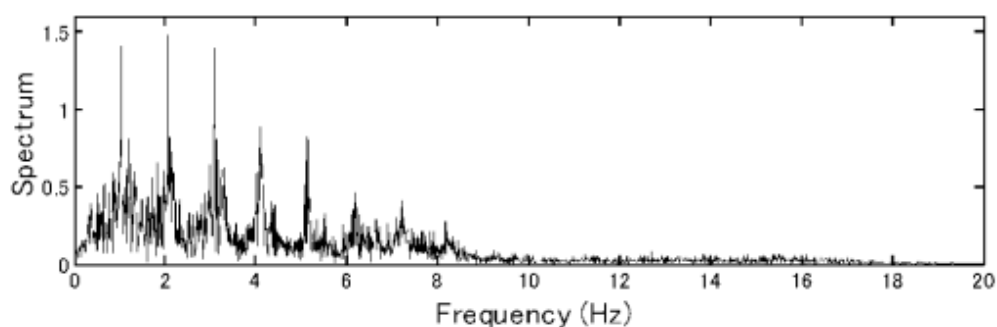


Figura 2.2.2: FFT de medida de infrasonido (rango 0-20 Hz) en aerogeneradores donde se detecta la presencia de la frecuencia de paso de pala (imagen extraída de referencia [28]).

Wind Turbine	Rated power	Distance	Infrasound level	Conditions
Monopteros 50	640kW	200m	84 dB (G)	11 m/s
Enercon E-40	500kW	200m	56 – 64 dB (G)	8 m/s
Vestas V66	1650kW	100m	70 dB (G)	(723 kW)
(Anonymous)	2000kW	200m	59 dB (G)	6 m/s
-	-	200m	65 dB (G)	12 m/s
Bonus	450kW	80m	65 dB (G)	9 m/s (4 turb.)
-	-	100m	71 dB (G)	8 m/s (1 turb.)
-	-	200m	63 dB (G)	10 m/s (1 turb.)
-	-	100 – 200m	70 dB (G)	9 m/s (4 turb.)
-	-	(n.a.)	67 dB (G)	Background, 9 m/s
MOD-1	2000kW	105m	107 dB (G)	
-	-	1000m	73 - 75 dB (G)	
WTS-4	4200kW	150m	92 dB (G)	
-	-	250m	83 - 85 dB (G)	
MOD-5B	3200kW	68m	71 dB (G)	
USWP-50	50kW	500m	67 - 79 dB (G)	(14 turbines)
WTS-3	3000kW	750m	68 dB (G)	
-	-	2100m	60 dB (G)	

Tabla 2.2.1. Resumen de medidas de infrasonido en turbinas eólicas (tabla extraída de referencia [27]).

Por último, existe un estudio [27] que recopila una serie de mediciones de infrasonidos en aerogeneradores de distinta potencia y a diferentes distancias de medida. Aunque en algunas de ellas no se especifican las condiciones (velocidad del viento o número de turbinas), en general se obtienen niveles en torno a 70 dBG o inferiores, como se observa en la Tabla 1.

3. CALIDAD SONORA EN AEROGENERADORES

3. CALIDAD SONORA EN AEROGENERADORES

3.1 Características de los infrasonidos

3.1.1 Introducción

Los infrasonidos, a cierto nivel, son frecuentes en todas partes en el medio natural: las personas están continuamente sometidas a sonidos de frecuencias infrasónicas. Las fuentes naturales de infrasonido incluyen el viento y las olas, y hay una amplia gama de fuentes creadas por el hombre como procesos industriales, vehículos y sistemas de climatización en edificios.

La magnitud del sonido, así como los infrasonidos, habitualmente se miden y se cuantifican en términos de decibelios (dB) con respecto a una referencia de 20 micropascales. Otra característica importante para describir el sonido es la frecuencia con que ocurren las oscilaciones de presión, expresada en Hertz (Hz).

3.1.2 Ponderaciones

Existe una variedad de ponderaciones que se utilizan para ajustar los niveles de ruido en función de frecuencia dependiendo del propósito. La ponderación A se usa comúnmente para ajustar los niveles de sonido a la aproximación de la sensibilidad del oído humano lo que convierte a esta ponderación en un descriptor inadecuado de infrasonidos. Es mucho mejor usar un nivel de decibelios no ponderado (lineal), y compararlo con niveles de criterio no ponderados en función de la frecuencia, o utilizar la ponderación G definida por la ISO y representada en la figura 3.1.1, para tratar específicamente a los infrasonidos, y comparar los niveles de la ponderación G con criterios expresados en dBG. Micrófonos e instrumentación están disponibles para medir infrasonidos y existen las Normas Internacionales [14] y [15] que definen estos procedimientos.

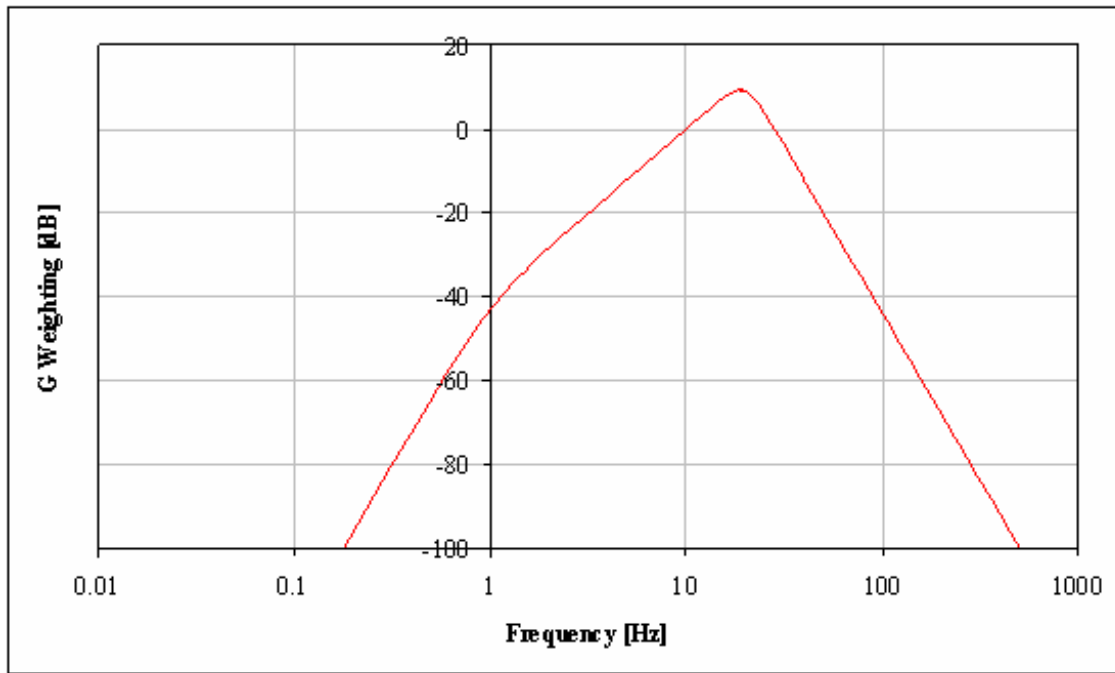


Figura 3.1.1: Representación gráfica de la ponderación G.

3.1.3 Umbrales

Se han publicado en los últimos años varios documentos e informes sobre el ruido de baja frecuencia en general, y en concreto, investigaciones de ruido de baja frecuencia producida por aerogeneradores.

Umbrales de audición por debajo de los cuales los infrasonidos no son por lo general discernibles a través de la audición o la percepción no auditiva se han documentado por varios investigadores como Berglund y Hassmen [2] y Watanabe y Møller [4]. Estos artículos presentan las curvas espectrales, con niveles de sonido en función de la frecuencia, que indican los límites de la percepción de tonos puros. Estos límites de la percepción varían desde unos 100 dB (lineal) a 5 Hz hasta unos 80 dB (lineal) a 20 Hz.

Varios informes y documentos también sugieren niveles de sonido ponderados G que podrían ser aceptables, incluyendo un informe de la Universidad de Massachusetts [29] en 2006 que sugiere niveles de umbral en el orden de 100 dBG a 10 Hz. Un informe preparado por el Gobierno británico [13] en 2003 sugiere que los niveles de sonido por debajo de 85-90 dBG no son suficientes para crear la percepción humana. La Agencia de Protección Ambiental en Dinamarca [30] ha desarrollado criterios de infrasonido en

general (no sólo para aerogeneradores) de 85 dBG, que permita expresamente un factor de 10 dB para las personas más sensibles de lo normal.

En términos de salud, a niveles suficientemente altos, los infrasonidos pueden ser peligrosos y causar graves daños a la salud. Sin embargo, es manifiestamente inexacto concluir que los infrasonidos, a cualquier nivel, causan riesgos de salud. Los infrasonidos plantean una preocupación en cuanto a vuelos espaciales, y los estudios elaborados para la NASA [31] sugieren que no hay efectos significativos de infrasonido hasta que el nivel excede los 125 dB (lineal). Un estudio de la Universidad de Massachusetts concluyó que "no hay evidencia fiable de que los infrasonidos por debajo del umbral de audición produzcan efectos psicológicos o fisiológicos".

En resumen, asumiendo que para el peor caso de que alguien pueda sentir molestia si puede percibir los infrasonidos, un nivel de sonido infrasónico en el rango de 85 dBG resulta apropiado para garantizar que no haya efectos adversos.

3.2 Niveles de infrasonidos producidos por aerogeneradores

Al evaluar si los aerogeneradores son capaces de producir infrasonidos o no existe una dificultad práctica al tratar de separar la influencia de los aerogeneradores de la influencia del viento. Las turbinas funcionan cuando hay viento, y el viento por sí solo crea infrasonido.

Un estudio realizado por HGC Engineering para la Pubnico Point Wind Farm [32] mostró que, independientemente de la fuente del infrasonido y de la distancia a los aerogeneradores, los niveles de infrasonidos estaban por debajo de la percepción o de los criterios de molestia.

Otro estudio de infrasonido [33] relevante para este trabajo se realizó para el Castle River Wind Farm en Alberta el cual concluyó que los infrasonidos están presentes cerca de las turbinas, pero no suponen una preocupación significativa.

Basándonos en lo anterior, es razonable concluir que en el rango de potencia habitual de los modernos aerogeneradores, éstos producen infrasonidos. A menudo, los niveles son

enmascarados lo suficiente por los niveles ambientales de infrasonidos debidos a otras fuentes, pero no siempre. En términos de niveles de sonido infrasónico, los niveles globales del orden de 80 a 90 dBG son los que cabría esperar cerca de los aerogeneradores, disminuyendo con la distancia a estos.

En las distancias más cercanas, en las que normalmente se encuentran las residencias cerca de los grandes aerogeneradores, es decir, a unos 300 metros, los niveles de infrasonidos son lo suficientemente bajos para no ser motivo de preocupación. En cualquier caso, la discusión de si los infrasonidos plantean o no un riesgo para la salud a bajos niveles es algo académico ya que, en ausencia de las turbinas de viento, existen niveles comparables de infrasonidos presentes en el medio natural.

En resumen, no hay evidencia que sugiera que los infrasonidos producidos por aerogeneradores causen problemas con respecto a la percepción o la salud humana. Esto es consistente con los estudios ya citados en este documento junto con los estudios publicados en Gran Bretaña [34] , Australia [35] , y Nueva Zelanda [36].

3.3 Características audibles de aerogeneradores

Si el infrasonido cerca de los parques eólicos no es perceptible, la cuestión sigue siendo si hay características acústicas que se pudieran percibir, aunque sea por error, como infrasonidos. El ruido producido por el aire que interactúa con las palas de la turbina tiende a ser ruido de banda ancha, pero es modulado en amplitud a la frecuencia de paso de pala, dando como resultado un “silbido” característico. Esta frecuencia moduladora está entorno a 1 Hz (dependiendo sobre todo del tamaño de las palas y de la velocidad del viento) y la frecuencia portadora (ruido de banda ancha) principalmente se encuentra en el rango de 250 a 1000 Hz.

Un error podría concluir que un nivel de sonido que se está siendo modulado a una frecuencia del orden de un Hercio debe ser infrasonido ya que la frecuencia de modulación es inferior a 20 Hz. Sin embargo, en este caso las ondas de presión de sonido que uno escucha, contienen una amplia gama de frecuencias (es decir, sonido de banda ancha), esto quiere decir que el nivel general incrementa y disminuye a una tasa de baja frecuencia. Según se muestra en las figura 3.3.1. Sin embargo, la modulación de

baja frecuencia del sonido audible de banda ancha no es igual a la presencia de infrasonidos.

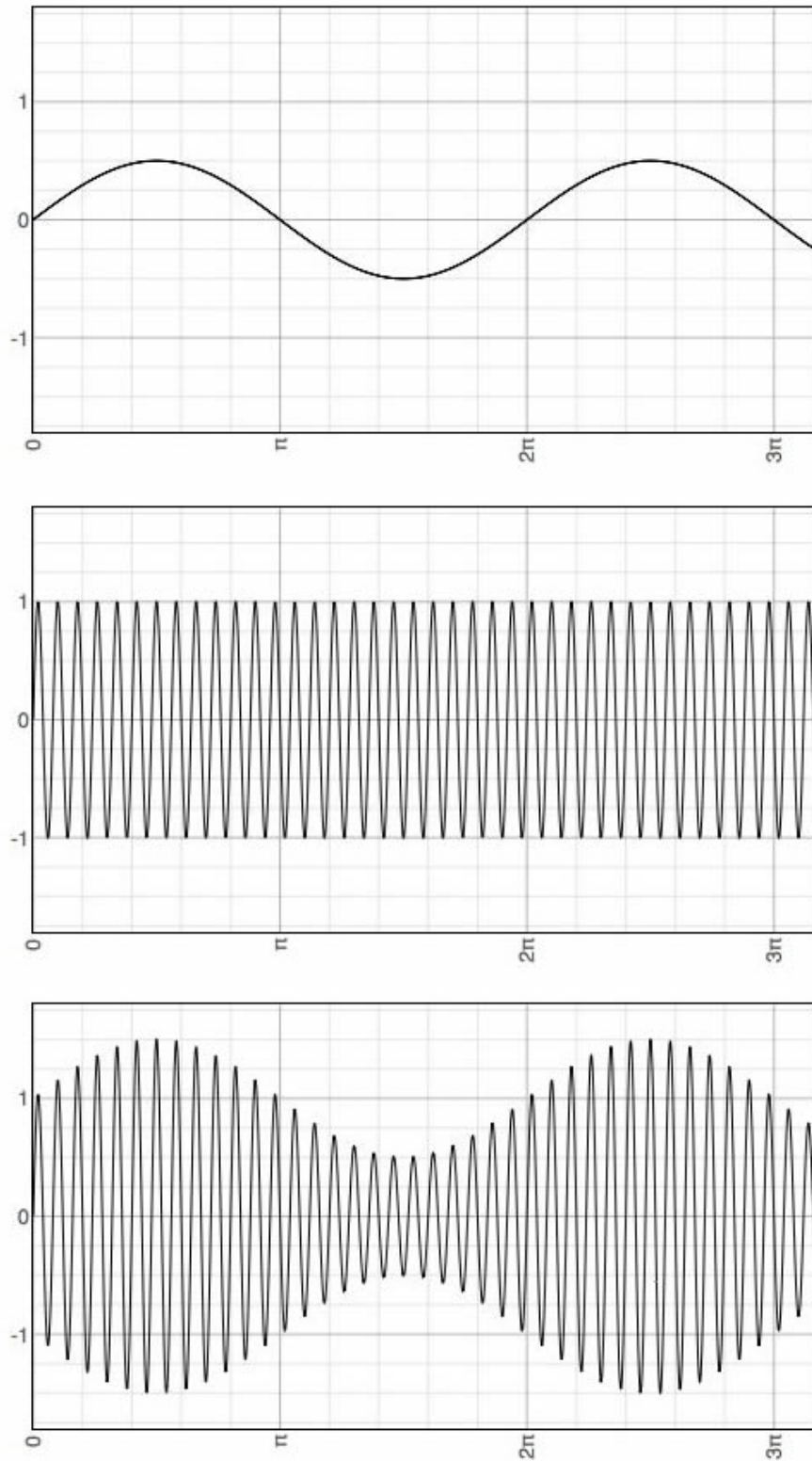


Figura 3.3.1: Señal Moduladora de baja frecuencia (Arriba), Señal Portadora de alta frecuencia (Medio), Señal Modulada (Abajo).

Consideremos que la expresión matemática de la señal portadora está dada por

$$v_p(t) = V_p \cdot \text{sen}(2\pi f_p t) \quad (1)$$

Donde V_p es el valor pico de la señal portadora y f_p es la frecuencia de la señal portadora. De manera similar podemos expresar matemáticamente a la señal moduladora

$$v_m(t) = V_m \cdot \text{sen}(2\pi f_m t) \quad (2)$$

Siendo V_m el valor pico de la señal moduladora y f_m su frecuencia. La señal modulada tendrá una amplitud que será igual al valor pico de la señal portadora más el valor instantáneo de la señal modulada.

$$\begin{aligned} v(t) &= (V_p + v_m(t)) \cdot \text{sen}(2\pi f_p t) \\ v(t) &= (V_p + V_m \cdot \text{sen}(2\pi f_m t)) \cdot \text{sen}(2\pi f_p t) \end{aligned} \quad (3)$$

luego sacando V_p como factor común

$$v(t) = V_p \left(1 + \frac{V_m}{V_p} \text{sen}(2\pi f_m t) \right) \text{sen}(2\pi f_p t) \quad (4)$$

Se denomina índice de modulación a

$$m = \frac{V_m}{V_p}$$

reemplazando m en (4)

$$v(t) = V_p (1 + m \cdot \text{sen}(2\pi f_m t)) \text{sen}(2\pi f_p t)$$

Operando

$$\begin{aligned} v(t) &= (V_p + V_p \cdot m \cdot \text{sen}(2\pi f_m t)) \text{sen}(2\pi f_p t) \\ v(t) &= V_p \cdot \text{sen}(2\pi f_p t) + V_p \cdot m \cdot \text{sen}(2\pi f_m t) \text{sen}(2\pi f_p t) \end{aligned} \quad (5)$$

recordando la relación trigonométrica

$$\text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

aplicamos esta entidad a la ecuación (5)

$$v(t) = V_p \text{sen}(2\pi f_p t) + \frac{mV_p}{2} \left\{ \cos[2\pi(f_p - f_m)t] - \cos[2\pi(f_p + f_m)t] \right\} \quad (6)$$

La expresión (6) corresponde a la señal modulada en amplitud. Donde se observa que tiene tres términos. El primero de ellos corresponde a una señal cuya frecuencia es la de la portadora, mientras que el segundo corresponde a una señal cuya frecuencia es diferencia entre portadora y moduladora y el tercero a una frecuencia suma de las frecuencias de la portadora y moduladora. Todo este conjunto da lugar a un espectro de frecuencias de las siguientes características, figura 3.3.2.

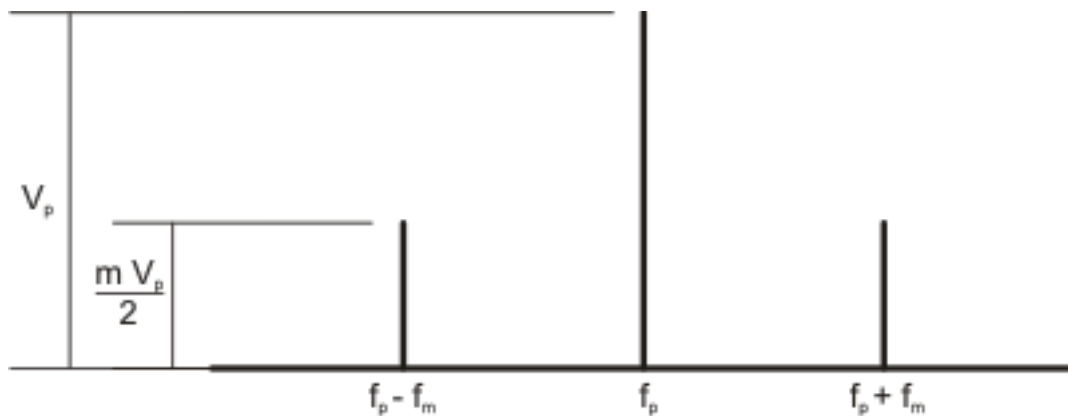


Figura 3.3.2: Espectro resultante de la modulación en amplitud.

Donde

$f_p - f_m$: frecuencia lateral inferior

$f_p + f_m$: frecuencia lateral superior

Debido a que la señal moduladora procedente de aerogeneradores no posee un espectro tonal, sino que tiene un espectro de banda ancha, la podemos desarrollar en serie de Fourier lo que origina una señal compuesta por la suma de señales de diferentes frecuencias. De acuerdo con esto, al modular no tendremos dos frecuencias laterales, sino que tendremos dos conjuntos a los que se denomina banda lateral inferior y banda lateral superior.

Otro fenómeno interesante se puede producir cuando más de una turbina eólica está cerca del punto de recepción. La frecuencia de modulación puede cambiar y variar, ya que cualquiera de los aerogeneradores no tienen por qué girar a la misma frecuencia o en fase, tal como se muestra en las figuras 3.3.3 y 3.3.4. La amplitud de la modulación

también puede variar si el sonido de las turbinas de viento comienza a sonar conjuntamente.

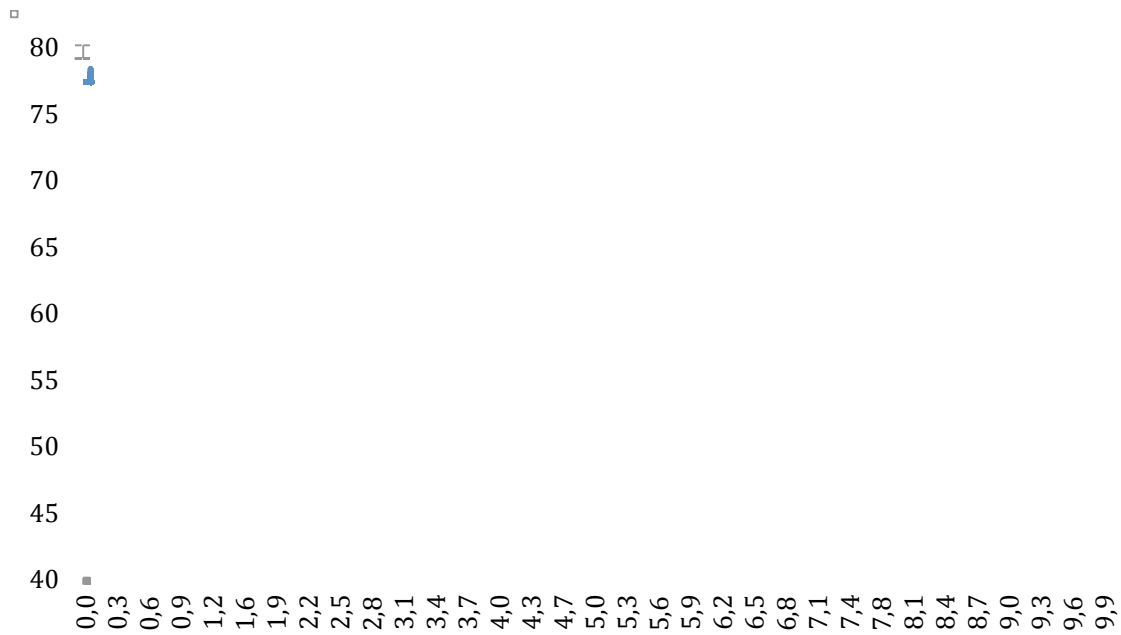


Figura 3.3.3: FFT de una de las medidas, donde se puede apreciar la frecuencia de paso de pala de un único aerogenerador.

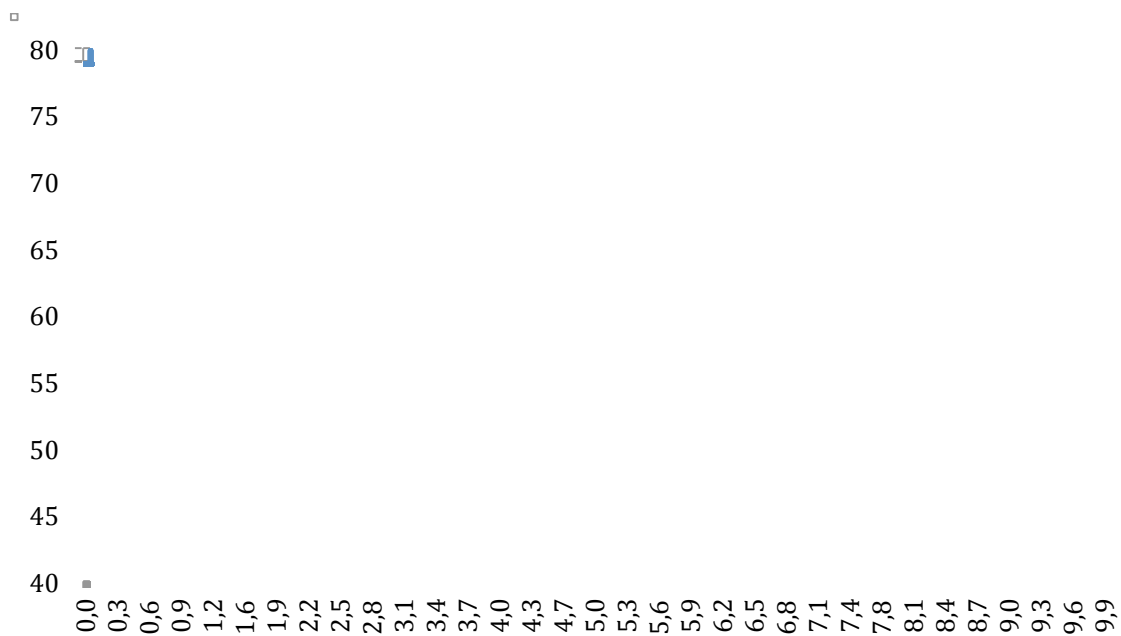


Figura 3.3.4: FFT de una de las medidas, donde se puede apreciar las diferencias entre las frecuencias de paso de pala de dos aerogeneradores.

La modulación de amplitud no aumenta el nivel del sonido, pero basándonos en investigaciones psicoacústicas [16] la percepción o la sonoridad subjetiva incrementa en relación con el nivel de la modulación de amplitud y este efecto es más notable para las frecuencias de modulación centradas cerca de 4 Hz. Así que para el “silbido” audible producido por el paso de pala cabe esperar un aumento de la sensibilidad al ruido de aerogeneradores, al igual que un aumento potencial de la molestia.

3.4 Características psicoacústicas de importancia en la molestia producida por el ruido de aerogeneradores

Se ha encontrado una relación muy débil entre las molestias y el nivel de ruido equivalente (L_{Aeq}) en otros estudios [37]. Esta débil relación con los niveles de ruido equivalente puede ser debida a una fuerte influencia de otros factores no relacionados con el ruido, como la actitud e intrusión visual. También es posible que las diferentes características del sonido en el ruido, no estén descritas plenamente por el nivel de ruido equivalente y que son de importancia en la molestia y la percepción del ruido. En el ruido procedente de aerogeneradores, hay una serie de parámetros de sonido que puede aumentar la percepción y la molestia, es decir, las modulaciones, la tonalidad y el equilibrio frecuencial y que pueden ser fácilmente apreciables si las turbinas están situadas en zonas con un nivel bajo de ruido de fondo. Por lo tanto es importante un mayor conocimiento sobre cómo las características del sonido del ruido procedente de aerogeneradores influyen en la molestia.

El objetivo de este apartado es describir algunos de los parámetros psicoacústicos desarrollados por Zwicker y Fastl [16] y comprobar si están relacionados con la molestia y la sensibilidad subjetivas a ruidos procedentes de aerogeneradores.

3.4.1 Sonoridad

La sonoridad es una medida subjetiva de la intensidad con la que un sonido es percibido por el oído humano. Esta métrica determina lo fuerte que es un sonido en relación con otro, y se define según Zwicker & Fastl [16] como “el nivel de presión sonora de un tono de 1kHz en una onda plana incidente y frontal que es tan fuerte como el sonido evaluado”, su unidad es el fonio. Es decir, un sonido que es tan fuerte como un tono de

1kHz con un nivel de presión sonora de 40 dB se dice que tienen un nivel de sonoridad de 40 fonios. El fonio está definido arbitrariamente como la sonoridad de un sonido senoidal de 1 KHz con un nivel de presión sonora de 0 dB_{SPL} . Así, 0 dB es igual a 0 fonios y 120 dB es igual a 120 fonios. Esto, siempre para sonidos sinusoidales con frecuencia de 1 kHz. La relación entre el nivel de presión sonora y la sonoridad para tonos puros se representa en las curvas isófonas.

Las curvas de igual sonoridad (isófonas), establecidas por Munson y Fletcher en 1930 (figura 3.4.1), muestran la relación que debe existir entre las frecuencias e intensidades de dos sonidos senoidales para ser percibidos igual de fuertes, es decir, con la misma sonoridad.

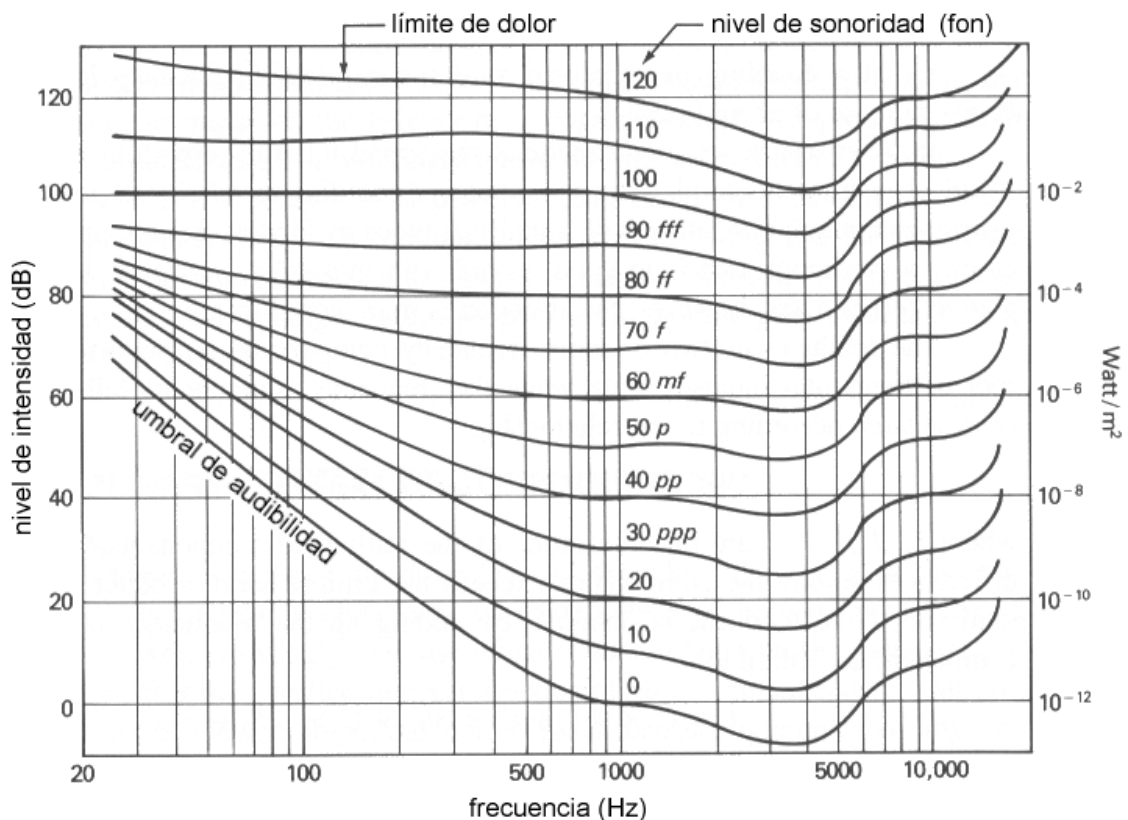


Figura 3.4.1: Representación de las curvas isófonas.

La dependencia de la sonoridad con la frecuencia está dada principalmente por las características del oído. A medida que el nivel de intensidad aumenta las curvas se aplanan, es decir, dicha dependencia disminuye.

El fonio es una unidad que no sirve para comparar la sonoridad de dos sonidos diferentes, sino que hace referencia a la sonoridad de un determinado sonido. Esto se debe a que la escala de fonios está relacionada con una escala logarítmica. La unidad que compara la diferencia de volumen o sonoridad de dos sonidos se denomina sonio.

El nivel de sonoridad equivale al nivel por comparación con un sonido de referencia (onda sonora de 1 kHz), mientras que la sonoridad (N_t) es el valor numérico de la fuerza de un sonido que es proporcional a una magnitud subjetiva evaluada por oyentes normales. El sonio está definido como la sonoridad de un sonido senoidal de 1 kHz con un nivel de intensidad sonora de 40 dB (Figura 3.4.2), y se puede expresar como:

$$N_t = 2^{\left(\frac{L_N - 40}{10}\right)} \quad (7)$$

Donde N_t se expresa en sonios y L_N en fonios.

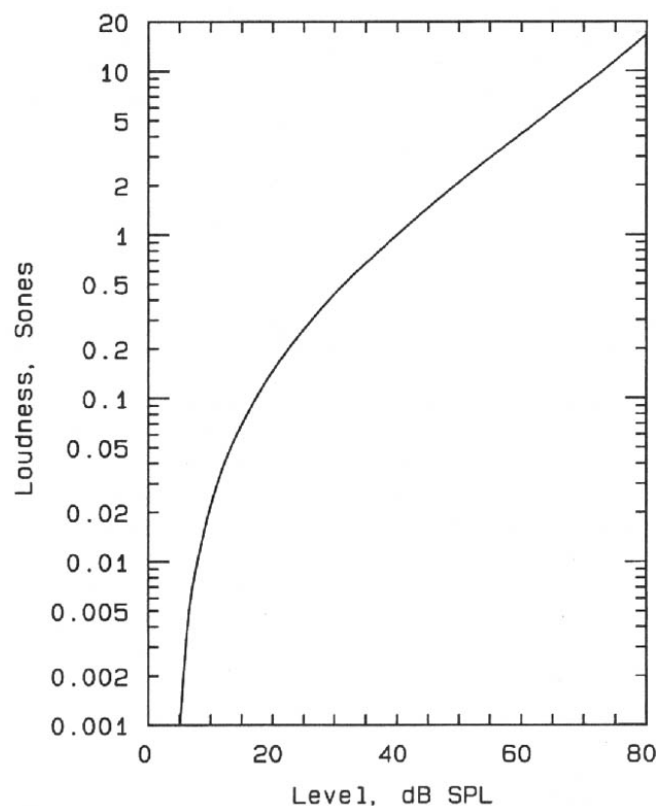


Figura 3.4.2: Relación entre el nivel SPL y la sonoridad en sonios para un tono puro de 1KHz.

El enmascaramiento frecuencial juega un papel importante en el cálculo de la sonoridad y este ocurre cuando un sonido impide la percepción de otro, es decir, lo enmascara. Si excitamos nuestra membrana basilar (Figura 3.8) con un tono puro, no sólo entrarán en movimiento las células filiales correspondientes a esa frecuencia, sino que también, aunque con menor intensidad, también lo harán los nervios adyacentes que se corresponden con frecuencias mayores y menores. La amplitud de la excitación a lo largo de la membrana basilar cuando escuchamos un tono puro define lo que llamamos curvas de enmascaramiento para ese tono puro (Figura 3.4.3). El ancho de banda de esa curva se denomina banda crítica y es diferente para cada una de las frecuencias.

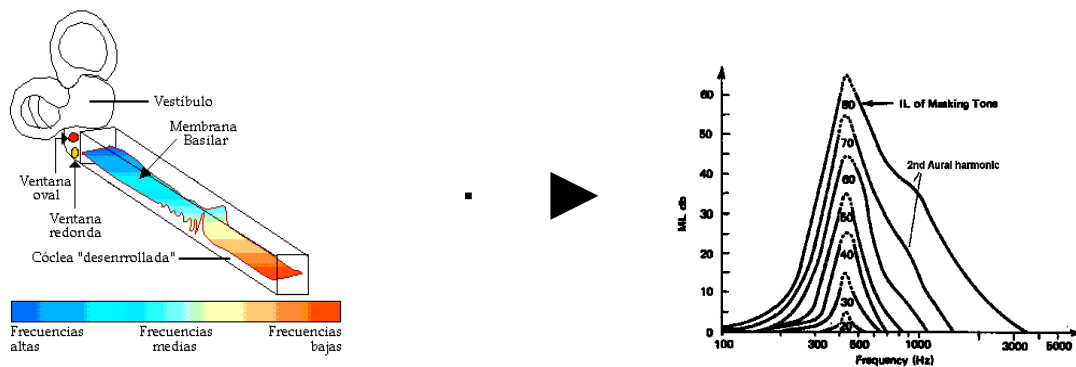


Figura 3.4.3: Representación del oído interno (izquierda) y representación gráfica del ancho de banda de las bandas críticas (derecha).

Por lo tanto, todos los sonidos que únicamente exciten las frecuencias correspondientes a la banda crítica se verán camuflados por el tono enmascarante.

Para representar la sonoridad respecto a la frecuencia, existe la sonoridad específica que se simboliza mediante N' . El rango frecuencial, a diferencia de un espectro habitual, que puede dividirse en octavas o tercios de octava, se fracciona en las bandas críticas de las siguientes 24 frecuencias como se puede apreciar en la tabla 1, cada una de estas bandas se denomina bark.

En la figura 3.4.4 se puede observar la sonoridad específica para un tono puro de 1 kHz a 94 dB. El bark con más sonoridad es el 9º, correspondiente a la frecuencia de 1000 Hz, y se aprecia como la caída de la sonoridad hacia frecuencias mayores es progresiva, representando el rango de enmascaramiento que ejerce el tono puro a 94dB.

La sonoridad es el único parámetro psicoacústico estandarizado y su cálculo exacto se especifica en la norma ISO532/R, que corresponde con la UNE 74-014-78.

Número	Frecuencia central (Hz)	Banda crítica (Hz)	Frecuencia de corte inferior (Hz)	Frecuencia de corte superior (Hz)
1	50	-	-	100
2	150	100	100	200
3	250	100	200	300
4	350	100	300	400
5	450	110	400	510
6	570	120	510	630
7	700	140	630	770
8	840	150	770	920
9	1000	160	920	1080
10	1170	190	1080	1270
11	1370	210	1270	1480
12	1600	240	1480	1720
13	1850	280	1720	2000
14	2150	320	2000	2320
15	2500	380	2320	2700
16	2900	450	2700	3150
17	3400	550	3150	3700
18	4000	700	3700	4400
19	4800	900	4400	5300
20	5800	1100	5300	6400
21	7000	1300	6400	7700
22	8500	1800	7700	9500
23	10500	2500	9500	12000
24	13500	3500	12000	15500

Tabla 3.4.1: Anchos de banda de los 24 barks a lo largo del eje frecuencial.

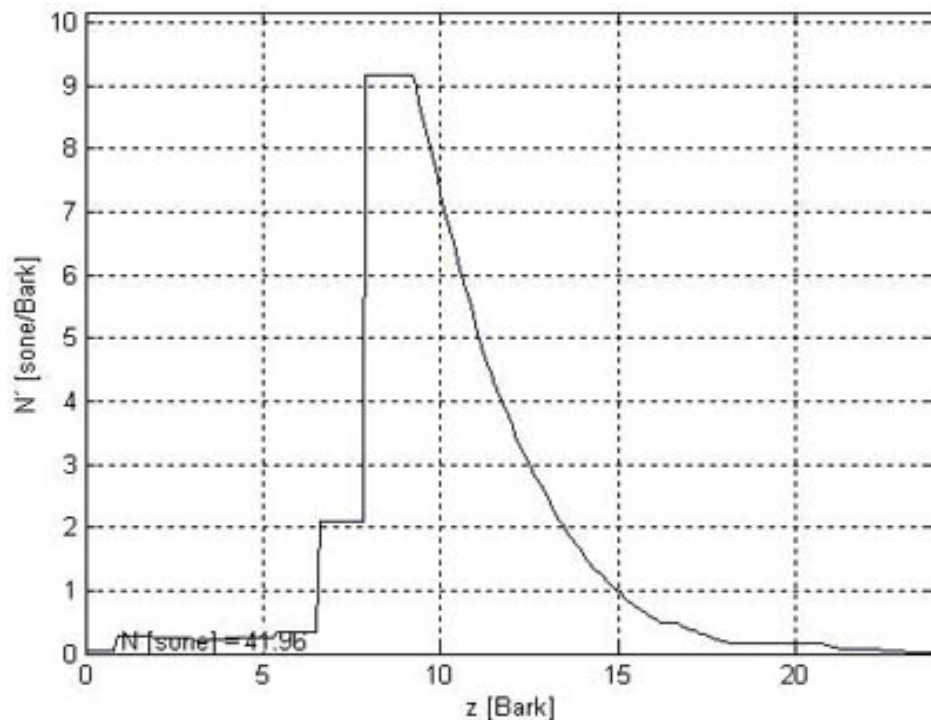


Figura 3.4.4: Sonoridad específica de un tono puro de 1kHz a 94 dB.

3.4.2 Fuerza de fluctuación

Existen dos parámetros psicoacústicos que caracterizan la modulación de amplitud, si la frecuencia de modulación toma valores entre 20 y 500 Hz se aprecia una aspereza o rugosidad. En cambio si aplicamos a una señal una modulación a baja frecuencia, de hasta 20 Hz, los cambios de intensidad en el sonido serán muy notorios y esto producirá una sensación de fluctuación en el oyente. Para cuantificar el grado de molestia que originan estos efectos utilizamos la rugosidad y la fuerza de fluctuación respectivamente.

En este apartado se detalla la fuerza de fluctuación teniendo en cuenta que los aerogeneradores modulan a una frecuencia muy baja, entorno a 1 Hz. Se denomina fuerza de fluctuación, al parámetro que cuantifica la molestia producida por un sonido que fluctúa a causa de una modulación. Esta sensación persiste hasta una frecuencia de modulación entorno a 20 Hz, a partir de este momento se hace patente la sensación de aspereza o rugosidad. En este sentido, existe una frontera difusa en el cambio de las dos sensaciones que es difícil de cuantificar con precisión tanto la una como la otra.

Su unidad de medida es el vacil que se define como la fuerza de fluctuación producida por un tono de 1000 Hz a 60 dB, modulado a 4Hz con un índice de modulación del 100%. Su valor máximo se encuentra a una frecuencia de modulación de 4 Hz. La fuerza de fluctuación se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$F = \frac{0.008 \cdot \int_0^{24 \text{ Bark}} \Delta L \cdot dz}{(f_{\text{mod}}/4\text{Hz}) + 4\text{Hz}/f_{\text{mod}}} \quad (8)$$

Donde f_{mod} es la frecuencia de modulación y ΔL es el índice de modulación percibido por el oyente.

Van den Berg [16] sugiere utilizar la siguiente fórmula para evaluar la fuerza de fluctuación F de un ruido de aerogenerador:

$$F = \frac{5.8(1.25m - 0.25)(0.05L_A - 1)}{(f_m / 5)^2 + (4 / f_m) + 1.5} \quad (9)$$

Donde la fuerza de fluctuación F se estima en vaciles, f_m es la frecuencia de modulación en Hz y L_A es el nivel de ruido ponderado A en banda ancha procedente del aerogenerador y m es el índice de modulación.

La fuerza de fluctuación es una función no lineal que es igual a cero hasta una profundidad de modulación (variación del nivel de ruido) de unos 3 dB y luego llega a máximo (aprox. 1,75 vaciles para ruido de banda ancha modulado en amplitud en la profundidad de modulación de 40 dB) con aumento del factor de modulación (o profundidad de la modulación).

Considerando que el ruido general está controlado por el ruido procedente de aerogeneradores, se puede hacer una mayor simplificación de la fórmula (8) que se basa en el supuesto de que la frecuencia de modulación para modernos aerogeneradores es de aproximadamente 1 Hz (Van Den Berg, [38]). De hecho, muchos aerogeneradores de alta potencia han optimizado los programas de control de “pitch” y velocidad angular.

La variación típica en la frecuencia de paso de pala para los modernos aerogeneradores tripala está entre 0.5 y 1.5Hz.

La molestia tiene tendencia a incrementar con la frecuencia de modulación o el aumento del factor de modulación. Esta tendencia concuerda con el hecho de que un oído humano es más sensible a la modulación de amplitud en las frecuencias en torno a 4Hz. Por lo tanto, diseñando aerogeneradores con velocidades de operación menores y niveles generales de ruido más bajos reduce la importancia de la modulación de amplitud para la percepción humana del ruido de aerogeneradores.

La fórmula (9) muestra que la fuerza fluctuación se hace perceptible con un factor de modulación por encima de 0.2. Este corresponde a la profundidad de la modulación de alrededor de 3,5 dB. Asimismo, de conformidad con investigaciones psicoacústicas (Fastl y Zwicker [14]) la modulación de amplitud mínima perceptible a frecuencias de modulación alrededor de 1 Hz pueden ser apreciadas con un factor de modulación de tan solo 0,02.

Se sugiere en (Fastl y Zwicker, [14]) que la percepción de la modulación de amplitud llega a ser significativa si alcanza el 10% de la fuerza relativa de fluctuación. Para un ruido de banda ancha modulado en amplitud se consigue para un valor de alrededor de 0.2 vaciles. Este valor se propone como criterio para decidir si la modulación de amplitud es una característica del ruido de aerogeneradores.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este apartado se definen la situación, los procedimientos utilizados en la medida y en el análisis de las emisiones acústicas de los aerogeneradores. En la parte 11 (Técnicas de medida de ruido acústico) de la norma UNE-EN 61400 [14] se detallan los procedimientos de medida y análisis que caracterizan las emisiones de ruido de un aerogenerador.

4.1 Entorno físico

Los parques eólicos objeto de estudio se encuentran situados en la provincia de Navarra, en la Zona Media Oriental y parte de la Ribera Estellesa (Figura 4.1.1). Concretamente en las comarcas de Tafalla, Pueyo, Olite, Leoz y Falces. Según se muestra en la figura 4.1.2.

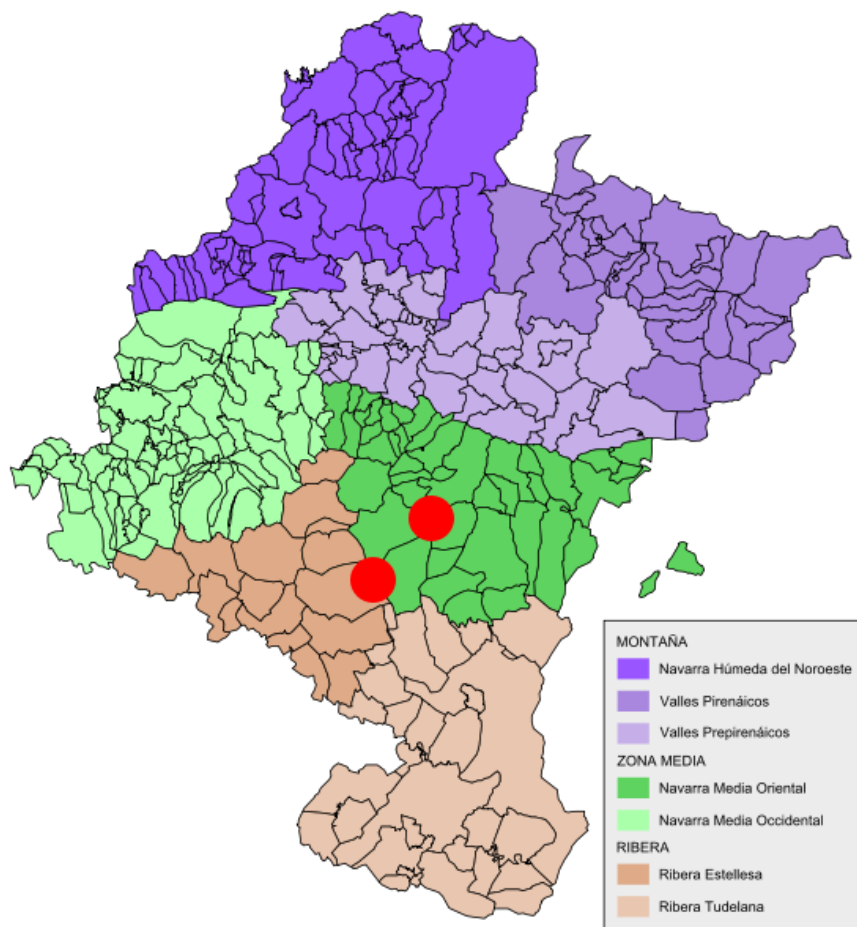


Figura 4.1.1: Mapa de la provincia de Navarra dividida en comarcas geográficas.

El parque Moncayuelo se encuentra entre las comarcas de Olite y Falcés y se compone de 32 aerogeneradores tipo AW77/1500. En este parque el aerogenerador sometido a estudio (figura 4.1.5) se encuentra entre los señalados con un círculo en la figura 4.1.3. Concretamente el tercero por la derecha. Esta zona se encuentra en terreno montañoso, donde la superficie se compone mayoritariamente de piezas de trigo ya cosechadas en el momento de la medida.

Por otro lado el parque Peñablanca se encuentra entre las comarcas de Tafalla, Leoz y Pueyo y se compone de 40 aerogeneradores del tipo AW77/1500 y 1 del tipo AW109/3000. El aerogenerador objeto de estudio (figura 4.1.6) es del tipo AW109/3000, se encuentra justo en medio del parque y se puede distinguir en la figura 4.1.4 ya que está representado por un círculo de color azul. El terreno en esta zona es muy parecido al de Moncayuelo ya que presenta una orografía montañosa dividida en piezas de trigo también cosechadas en el momento de la medida.

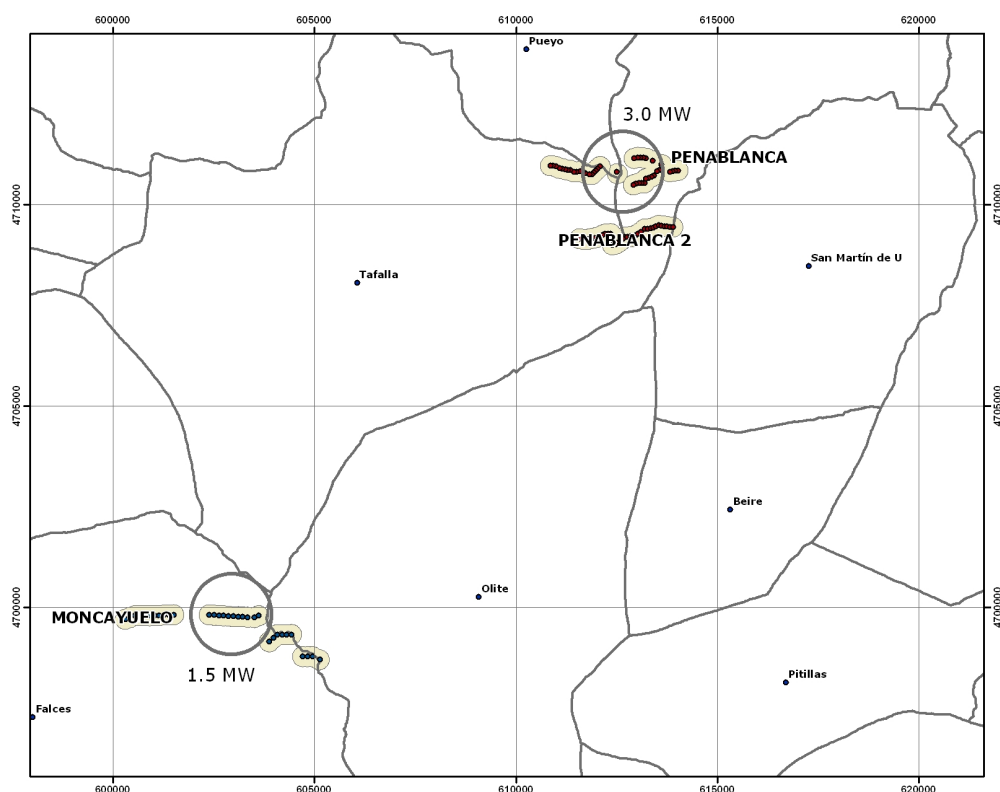


Figura 4.1.2: Situación comarcal de los parques eólicos objeto de estudio.

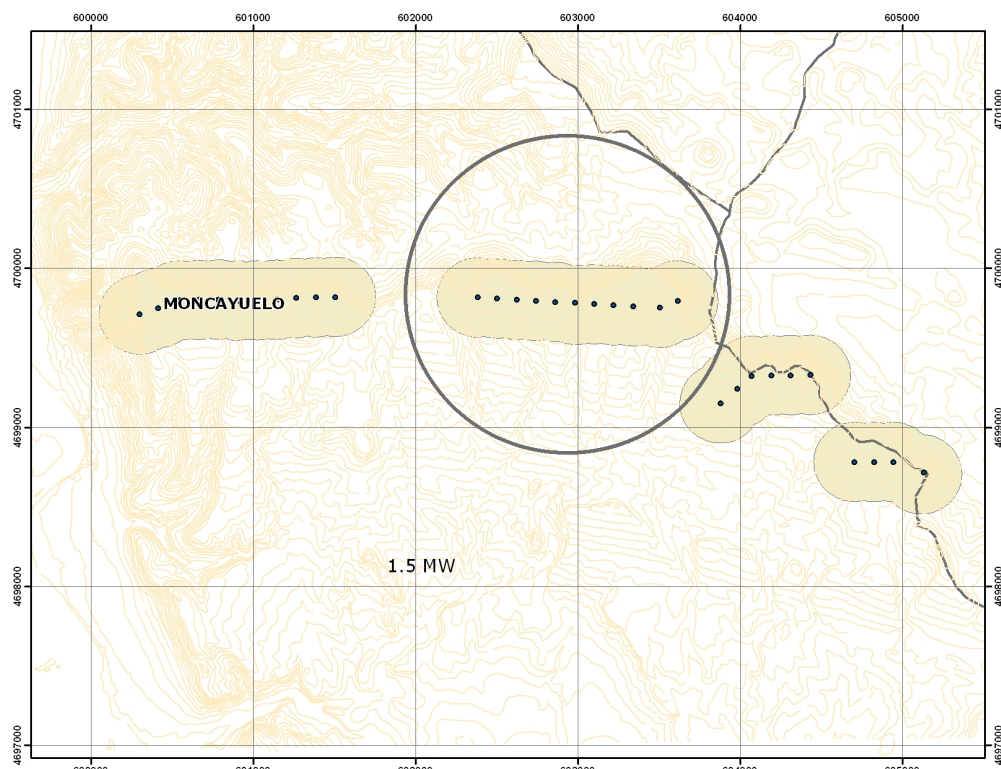


Figura 4.1.3: Situación del molino objeto de estudio dentro del parque Moncayuelo.

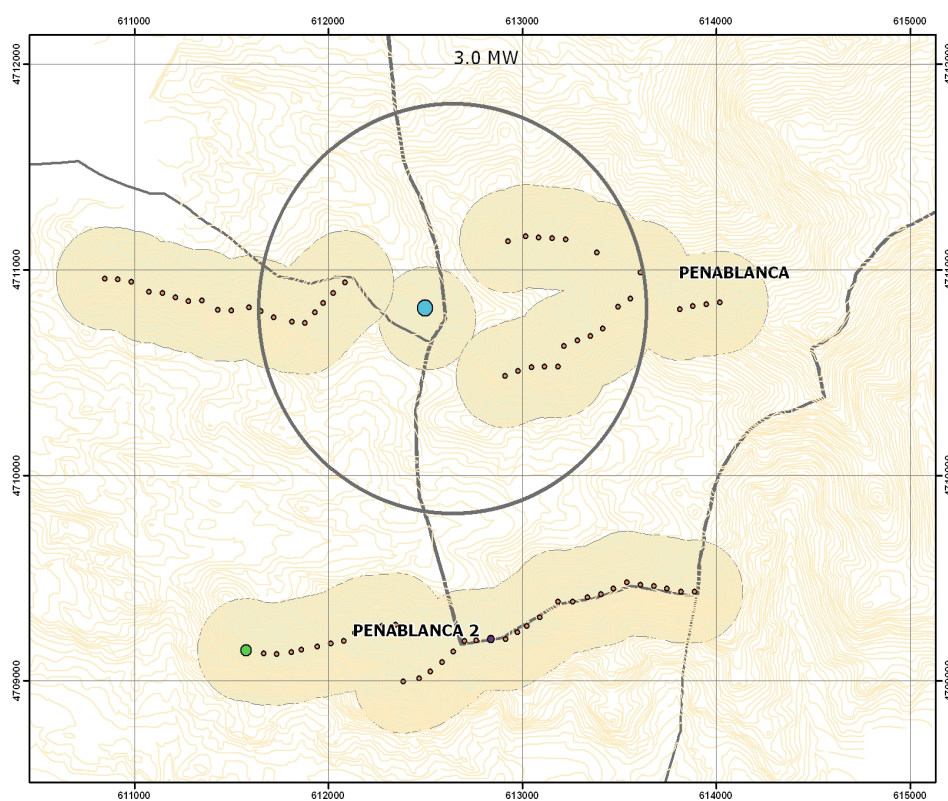


Figura 4.1.4: Situación del molino objeto de estudio dentro del parque Peñablanca.



Figura 4.1.5: Fotografía del molino objeto de estudio en el parque Moncayuelo.



Figura 4.1.6: Fotografía del molino objeto de estudio en el parque Peñablanca.

4.2 Procedimiento de Medida

Para caracterizar completamente la emisión de ruido de los aerogeneradores, se utilizaron las siguientes posiciones de medida.

4.2.1 - Posición de medida acústica

En ambos parques eólicos se utilizó una única posición de medida, aguas abajo del aerogenerador, tal como se muestra en la figura 4.2.1.

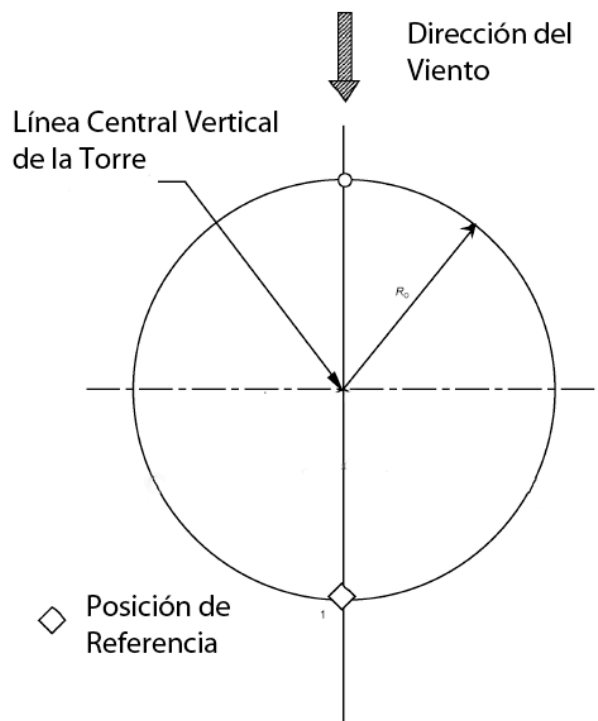


Figura 4.2.1: Patrón normalizado para la posición de medida del micrófono.

Cabe destacar que se realizaron en diferentes días dos medidas en cada parque. Las mediciones realizadas en Moncayuelo se realizaron ambas con viento norte mientras que en Peñablanca se obtuvieron con viento norte y viento sur respectivamente.

Como se muestra en la figura 4.2.2, la distancia horizontal R_0 desde el eje central vertical de la torre del aerogenerador a la posición de medida, para aerogeneradores de eje horizontal, está dada por:

$$R_0 = H + D/2$$

Donde

H es la distancia vertical desde el suelo hasta el centro del rotor; y

D es el diámetro del rotor

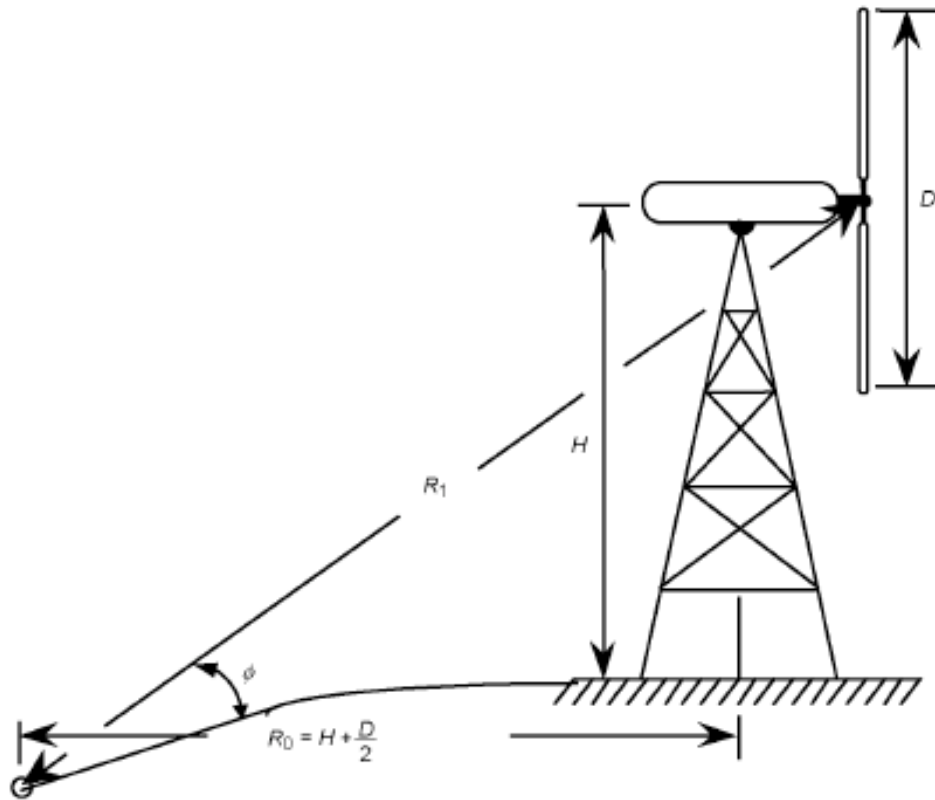


Figura 4.2.2: Aerogenerador de eje horizontal.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las dimensiones de cada modelo de máquina, las posiciones de medida para los aerogeneradores objeto de estudio se situaron a una distancia R_0 de 117 m para el AW77/1500 ($H = 78,5$ m y $D = 77$ m) y 154.5 m para el AW109/3000 ($H = 100$ m y $D = 109$ m).

4.2.2 Posiciones de medida de velocidad y de dirección de viento

El anemómetro de ensayo y la veleta de dirección se montaron aguas arriba del aerogenerador a una altura de 10 m. Como utilizamos el método de determinación de la velocidad de viento mediante anemómetro, la región permitida en la que el anemómetro y la veleta deben estar situados se muestra en la figura 4.2.3.

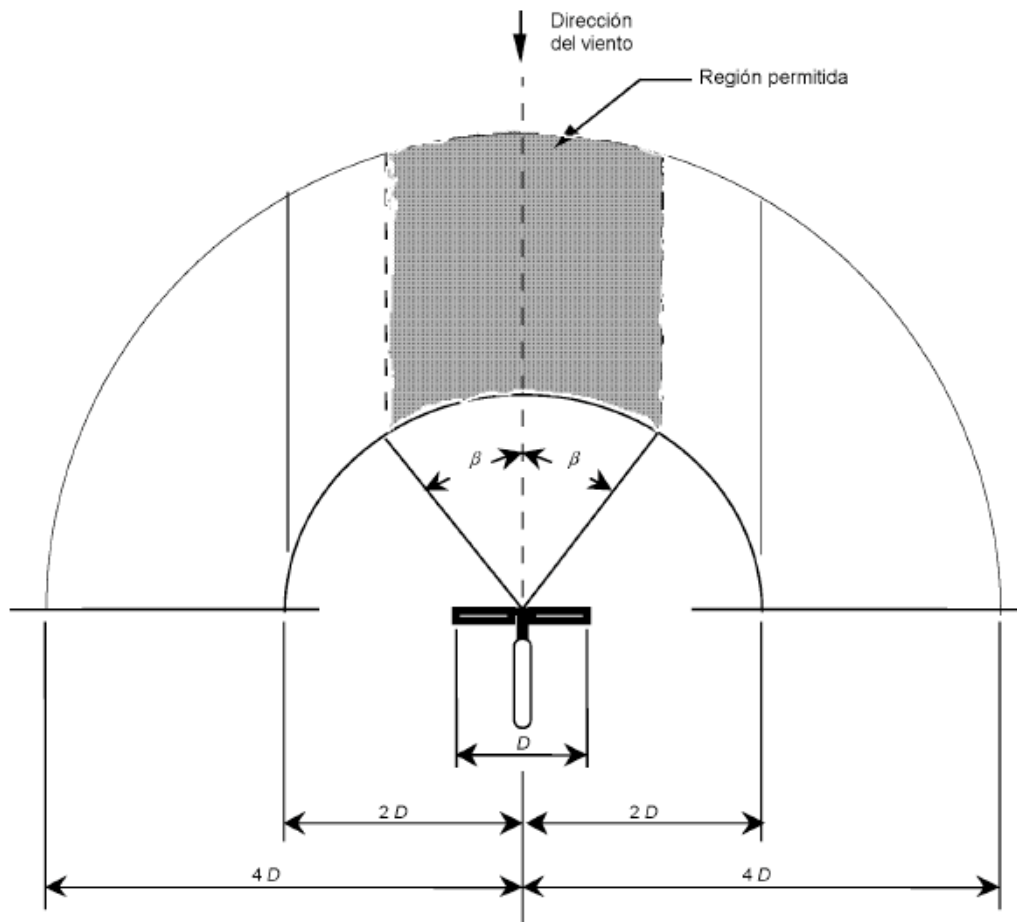


Figura 4.2.3: Región permitida para la posición de la torre meteorológica en función de β - Vista en planta.

El ángulo β esta dado por:

$$\beta = \frac{z - z_{ref}}{H - z_{ref}} (\beta_{m\acute{a}x.} - \beta_{m\acute{i}n.}) + \beta_{m\acute{i}n.}$$

Donde

z es la altura del anemómetro, véase figura 4.2.4;

z_{ref} es la altura de referencia de 10 m;

H es la altura del centro el rotor o el plano ecuatorial del aerogenerador, véase figura 2;

$\beta_{m\acute{a}x.}$ es el ángulo máximo β , $\beta_{m\acute{a}x.} = 90^\circ$;

$\beta_{m\acute{i}n.}$ es el ángulo mínimo β , $\beta_{m\acute{i}n.} = 30^\circ$;

Ya que el anemómetro se situó a una altura de 10 m la región permitida para el anemómetro fue de $\beta = \pm 30^\circ$.

4.2.3 Medidas acústicas

Las medias acústicas nos han permitido determinar la siguiente información sobre la emisión de ruido de los aerogeneradores a las velocidades de viento de referencia desde 6 hasta 16 m/s.

- El nivel de presión sonora en relación con el viento;
- El espectro por bandas de tercio de octava, desde 0.8 Hz hasta 20 KHz,;
- La FFT de alta resolución, desde 0 Hz hasta 20 KHz;
- El Nivel de Potencia Sonora Aparente;
- Análisis psicoacústico;
- Creación de wavs.

4.2.4 Medidas no Acústicas

Las siguientes medidas no acústicas fueron realizadas.

- Medidas de velocidad de viento;
- Dirección del viento;

4.3 Descripción de la medida

Como ya se ha descrito anteriormente se realizaron dos medidas en cada parque bajo diferentes condiciones meteorológicas.

El primer día de medida tuvo lugar el 12 de Agosto de 2010. Por la mañana, en torno a las 11 horas, comenzaron las medidas en Peñablanca. En este caso las medidas se realizaron con viento norte a velocidades de entre 7.55 y 13.28 m/s. En primer lugar se realizó la medida con la maquina AW109/3000 en marcha, con el fin de obtener los niveles sonoros producidos por el aerogenerador en cuestión. La medida comenzó a las 11:17 y concluyó a las 12:05 horas, obteniendo 49 medidas de un minuto cada una, bajo velocidades de viento de entre 7,55 y 13,27 m/s. Al finalizar esta medición la máquina paró. Entonces se volvió a realizar una medición con la intención de evaluar el ruido de fondo presente en el parque, esta comenzó a las 12:07 y concluyó a las 12:40, obteniéndose 20 medidas de un minuto, bajo velocidades de entre 9,43 y 13,28 m/s.

Por la tarde, ya en el parque Moncayuelo, se volvió a repetir el proceso, realizándose dos tandas de medidas, una con el aerogenerador objeto de estudio, el AW77/1500 en marcha, parando otras cuatro máquinas que flanqueaban a ésta por ambos lados (figuras 4.3.1 y 4.3.2) y otra para evaluar el ruido de fondo con la maquina parada. Las medidas se realizaron de nuevo con viento norte, a velocidades de entre 10,08 y 15.57 m/s para la primera medida, que comenzó a las 15:58 y terminó a las 16:41 horas obteniendo 44 medidas de un minuto cada una. La segunda medida comenzó a las 16:50 y concluyó a las 17:03 horas, obteniendo 14 medidas de un minuto, bajo velocidades de viento de entre 9,38 y 14,89 m/s.

El segundo día de medida tuvo lugar el 28 de Septiembre de 2010. Las grabaciones se realizaron en el parque Moncayuelo, con un proceso similar al de las medidas realizadas el 12 de Agosto, es decir, mediante dos tandas de medidas, una para medir el nivel sonoro producido por el aerogenerador, el AW77/1500, parando otros cuatro molinos de la misma potencia, dos a la izquierda y dos a la derecha, y otra medida para evaluar el

ruido de fondo, con la máquina parada. Las medidas se realizaron con viento norte a velocidades de entre 5,34 y 9,18 m/s, la primera tanda comenzó a las 18:35 y concluyó a las 19:02 horas obteniendo una medida de 28 minutos de duración, bajo velocidades de entre 5,34 y 8,17 m/s, mientras que la medida de ruido de fondo comenzó a las 19:03 y terminó a las 19:27 horas, obteniendo una grabación de 25 minutos, bajo velocidades de viento de entre 5,42 y 9,18.

El ultimo día de medida tuvo lugar el 7 de Octubre de 2010, en el parque Peñablanca bajo condiciones de viento sur a velocidades de entre 4,94 y 12,59 m/s, la medida se realizó en tres tandas, una para evaluar el nivel sonoro del aerogenerador y dos para el nivel de ruido de fondo, parando dos máquinas tipo AW77/1500 cercanas (Figura4.3.3). La primera tanda comenzó a las 17:21 y terminó a las 17:29 en la que se obtuvo una grabación del ruido de fondo de 9 minutos, la segunda comenzó a las 17:31, finalizó a las 18:02 y se pudo obtener una medida del nivel de presión sonora del aerogenerador de 32 minutos y finalmente la tercera tanda comenzó a las 18:22, concluyendo a las 18:39 obteniéndose una grabación del ruido de fondo de 18 minutos.



Figura 4.3.1: Fotografía de los dos aerogeneradores situados a la izquierda del aerogenerador objeto de estudio (AW77/1500).



Figura 4.3.2: Fotografía de los dos aerogeneradores situados a la derecha del aerogenerador objeto de estudio (AW77/1500).



Figura 4.3.3: Fotografía de los dos aerogeneradores (derecha) cercanos al aerogenerador objeto de estudio (AW109/3000), que se tuvieron en cuenta.

4.4 Configuración de la medida

En todas los días de medida se utilizó la siguiente configuración de medida;

Para la grabación del sonido procedente de los aerogeneradores se utilizaron 5 micrófonos. Por una parte, dos de estos micrófonos se montaron a la altura del suelo sobre una placa plana dura, con el objetivo de reducir el ruido del viento generado en ambos micrófonos y reducir la influencia del tipo de suelo, además se recubrieron con dos paravientos, uno primario y otro secundario con la finalidad de reducir el efecto del viento en los micrófonos. Uno de estos micrófonos está diseñado especialmente para la medida de infrasonidos y el otro era un micrófono de respuesta en frecuencia normal (20 Hz – 20 KHz) el cual, dependiendo del día y del tipo de micrófono, se acoplaba o no al sonómetro, tal como se muestra en la figuras 4.4.1 y 4.4.2. Cabe destacar que el paravientos secundario no se utilizó en el primer día de medida.



Figura 4.4.1: Fotografía de los dos micrófonos situados sobre la placa recubiertos con el paravientos primario.



Figura 4.4.2: Fotografía de los dos micrófonos situados sobre la placa recubiertos con los paravientos primario y secundario.

El resto de los micrófonos, también de respuesta frecuencial normal, se montaron a una altura aproximada de un metro, uno de ellos sobre un trípode y los otros dos estaban situados en una cabeza binaural apoyada sobre una caja de plástico.

La figura 4.4.3 muestra los cinco micrófonos, dos sobre la placa y bajo el paraviento, otro montado en un trípode y los dos últimos situados en la cabeza binaural.

Todo el conjunto de micrófonos excepto el del sonómetro se conectó a una interfaz conectada en red LAN a un ordenador portátil equipado con el software Pulse LabShop, el cual registró todas las mediciones salvo las del sonómetro. Esta equipación se ubicó en el interior de un automóvil junto con las personas encargadas de realizar la medición con el fin de evitar que se filtraran sonidos no deseados.



Figura 4.4.3: Fotografía de la configuración de medida.

5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

5.1 Especificaciones técnicas del equipo de medida

En este apartado citaremos y describiremos todo el material utilizado para la realización del proyecto. Comenzaremos con los dispositivos usados para la grabación del sonido procedente de los aerogeneradores.

5.1.1 Ordenador “HP ProBook 6540b”

Características

- Sistema operativo: Windows XP.
- Tipo de procesador: Intel(R) Core(TM) i5 CPU M 520 @ 2.40Ghz.
- Memoria RAM: 2,99 GB.
- Memoria ROM: 500 GB.
- Tipo de sistema: Sistema operativo de 32 bits.



5.1.2 Cabeza binaural “HEAD Acoustics”

Características

Cabeza binaural HEAD Acoustics, Modelo HSU III, con dos micrófonos de condensador polarizados a 200 V en cada oreja con sensibilidades alrededor de 53 mV/Pa.



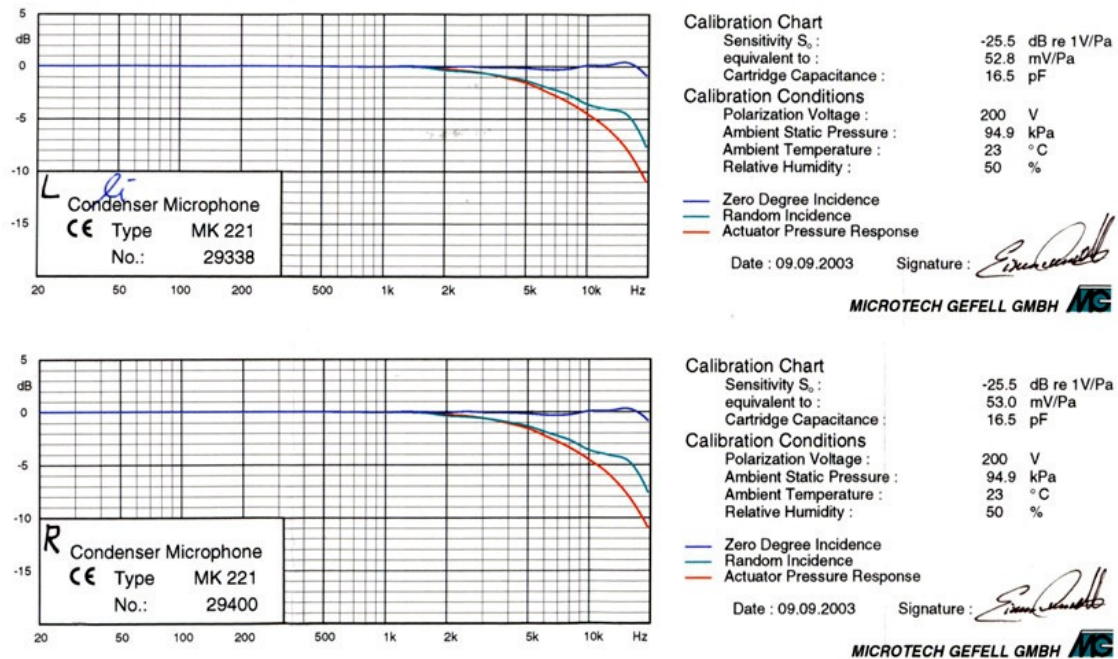


Figura 5.1: Respuesta en frecuencia de los dos micrófonos de condensador colocados en cada uno de las orejas de la cabeza binaural.

5.1.3 Interfaz del software PULSE módulo 3560C

Características

- Unidad de adquisición de datos portátil, de 17 canales de entrada.
- Funciona con batería o fuente de alimentación del tipo 2827.
- Está protegido por una carcasa robusta para un uso diario e industrial.
- Se comunica con el PC mediante un cable LAN cruzado.
- Los ventiladores de refrigeración se puede desactivar para un funcionamiento silencioso.



5.1.4 Microfono G.R.A.S.**Características**

- 5.2 Tipo: 40 AC.
- 5.3 N° de Serie: 6563.
- 5.4 Sensibilidad: 12.5 mV/Pa.
- 5.5 Voltaje de polarización: 200V.
- 5.6 Rango Dinámico: 160 dB re. 20 μ Pa.
- 5.7 Capacitancia: 17 pF.
- 5.8 Rango de Temperatura: -10°C hasta + 50°C.
- 5.9 Direccionalidad: omnidireccional.
- 5.10 Respuesta en frecuencia:



Desde (Hz)	Hasta (KHz)	Precisión(dB)
3,15	40	± 2
5	16	± 1

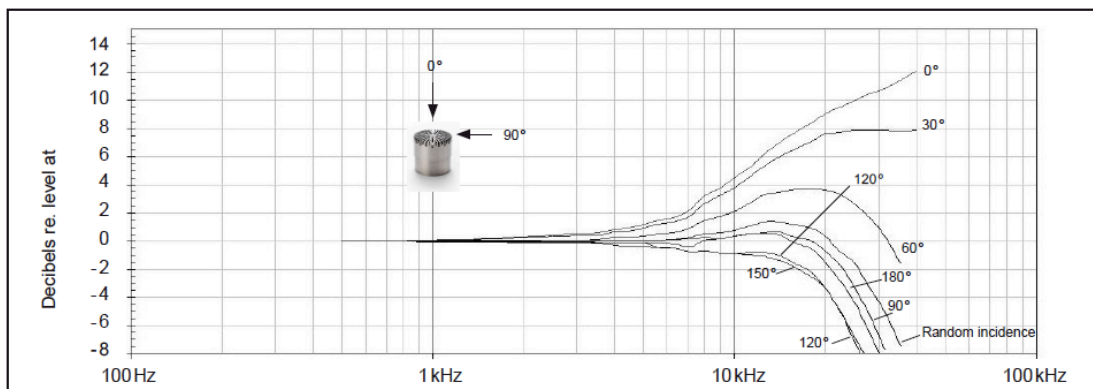
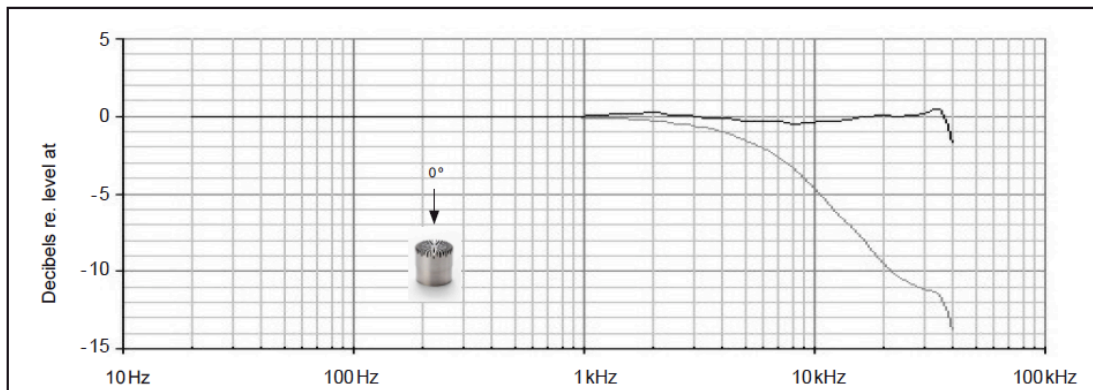


Figura 5.2: Respuesta en frecuencia del micrófono G.R.A.S. Tipo 40AC. La curva superior muestra la respuesta en campo abierto a 0°, la curva inferior muestra la respuesta en presión. (Arriba) y correcciones en campo abierto para diferentes ángulos de incidencia (Abajo).

5.1.5 Micrófono de baja frecuencia B&K

Este micrófono está especialmente diseñado para la medida de infrasonidos. La polarización es externa por lo que debe ser usado con un preamplificador clásico. Cuando se usa con el adaptador UC-0211, la frecuencia limite inferior del preamplificador se reduce a 0.1 Hz.

Usos

- Medidas de infrasonidos.
- Estampidos sónicos.
- Medidas generales de campos de presión.

Características

- Tipo: 4193.
- N° de Serie: 2715388.
- Sensibilidad: 12.5 mV/Pa.
- Voltaje de Polarización: 200V.
- Rango Dinámico: 19 – 162 dB.
- Capacitancia: 19.1 pF.
- Temperatura: de -30 hasta 300°C (de -22 hasta 572°F).
- Respuesta en Frecuencia:



Desde (Hz)	Hasta (KHz)	Precisión(dB)
0,12	7	± 1
0,07	20	± 2
0,13	20	± 2 (con UC-211)

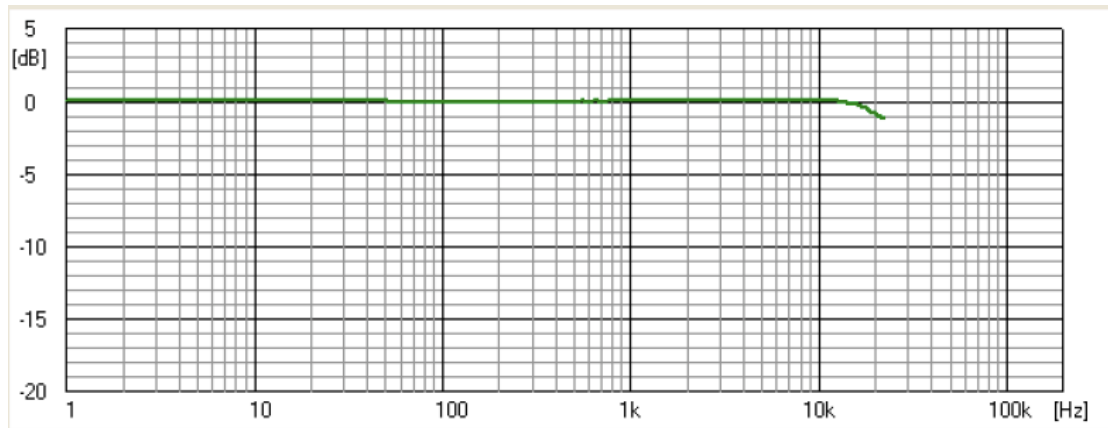


Figura 5.3: Respuesta en frecuencia del micrófono B&K Tipo 4193.

5.1.6 Sonómetro analizador de precisión B&K

Usos

- Medidas de ruido en general.
- Análisis detallado en bandas de 1/1 y 1/3 de octava.
- Valoración y evaluación de reducción de ruido.
- Captación de datos en campo para post-análisis.
- Investigación y desarrollo.



Características

- Sonómetro Tipo 1 según normas UNE, CEI y ANSI.
- Análisis en tiempo real en bandas de octava y 1/3 de octava.
- Estadísticas de los niveles globales.

5.1.7 Micrófono de campo abierto prepolarizado para sonómetro de B&K

Usos

- Medidas acústicas de precisión
- Diseñado para sonómetros de primera calidad

Características

- Tipo: 4189
- N° de Serie: 2607643
- Sensibilidad: 49.64 mV/Pa
- Voltaje de Polarización: 0V
- Rango Dinámico: 14.6 - 146 dB
- Capacitancia: 13.2 pF
- Temperatura: -30 hasta +150°C (-22 hasta +302°F)
- Respuesta en Frecuencia: 6.3Hz – 20Khz

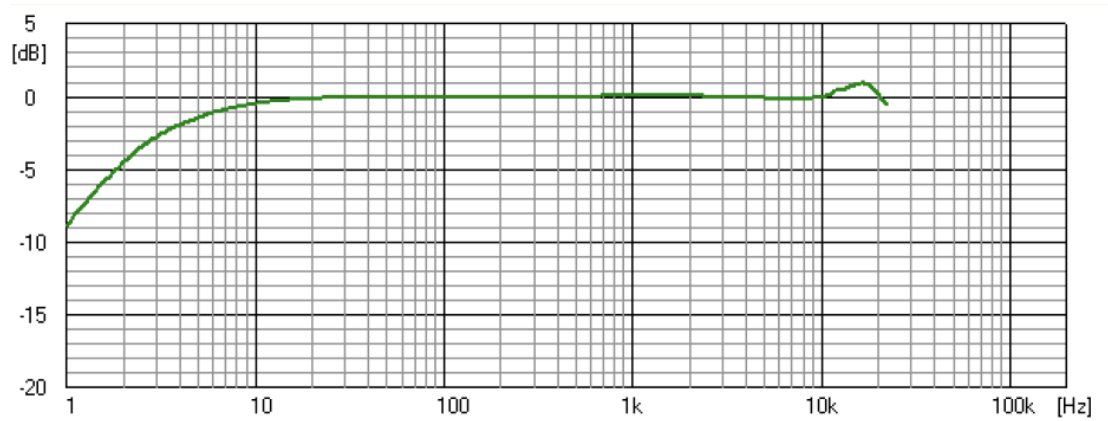


Figura 5.4: Respuesta en frecuencia del micrófono B&K Tipo 4189.

5.1.8 Placa reflectante y paravientos

Placa reflectante

Los dos micrófonos se montaron sobre una placa plana dura con el diafragma del micrófono en un plano normal a la placa y con el eje del micrófono apuntando hacia el aerogenerador, tal como se muestra en las figuras 5.5a y 5.5b.

Características

La placa es circular de 1.2 m de diámetro y está fabricada en aglomerado de madera duro con un espesor de 1.5 cm. Está dividida en 3 partes a nivel en el mismo plano, con una separación menor de 1 mm

Paravientos

Los dos micrófonos se recubrieron mediante dos paravientos, uno primario y otro secundario, con el objetivo de reducir el ruido inducido por el viento en los micrófonos.

Características

El paraviento primario posee forma de media esfera de espuma de célula abierta con un diámetro de 90 mm, centrado alrededor del diafragma del micrófono, como se muestra en la figura 5.6a.

El paraviento secundario consiste en un esqueleto formado por varillas de PVC de forma aproximadamente hemiesférica con un diámetro de 52 cm, el cual se recubre con una capa de espuma de célula abierta con un espesor de 2,5 cm, situado simétricamente sobre el paravientos primario, tal como se muestra en la figura 5.6b.

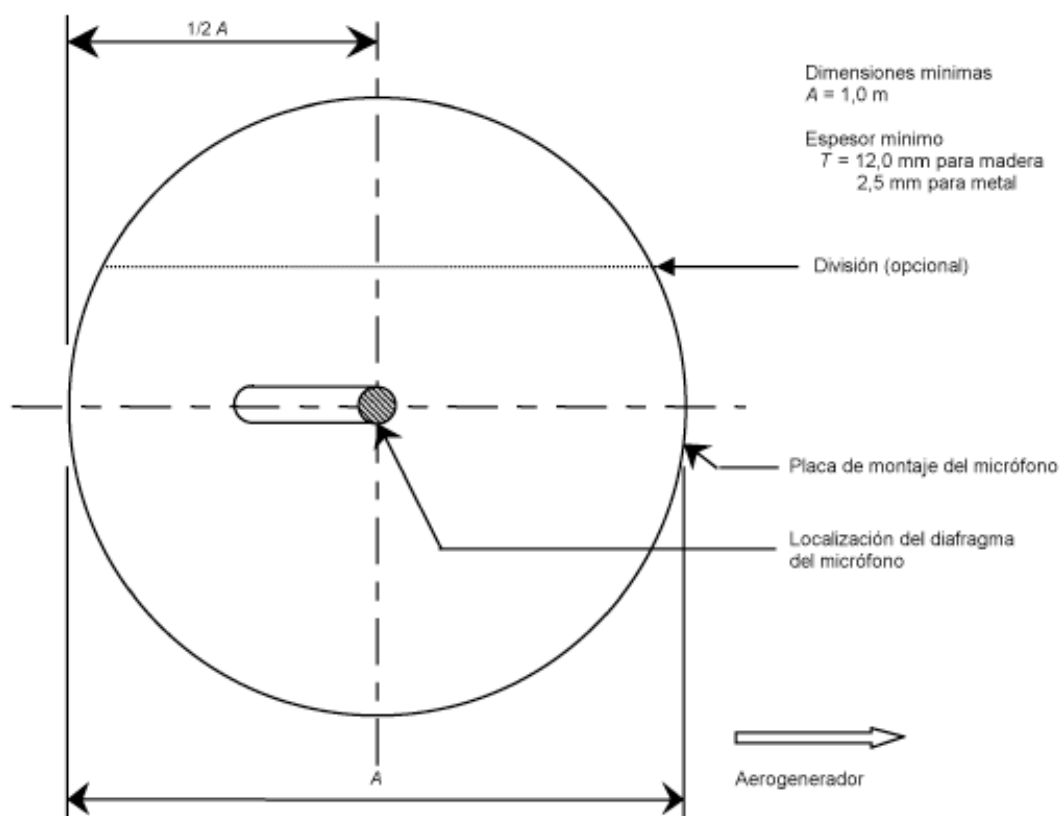


Figura 5.5a: Montaje del micrófono – Vista en planta.

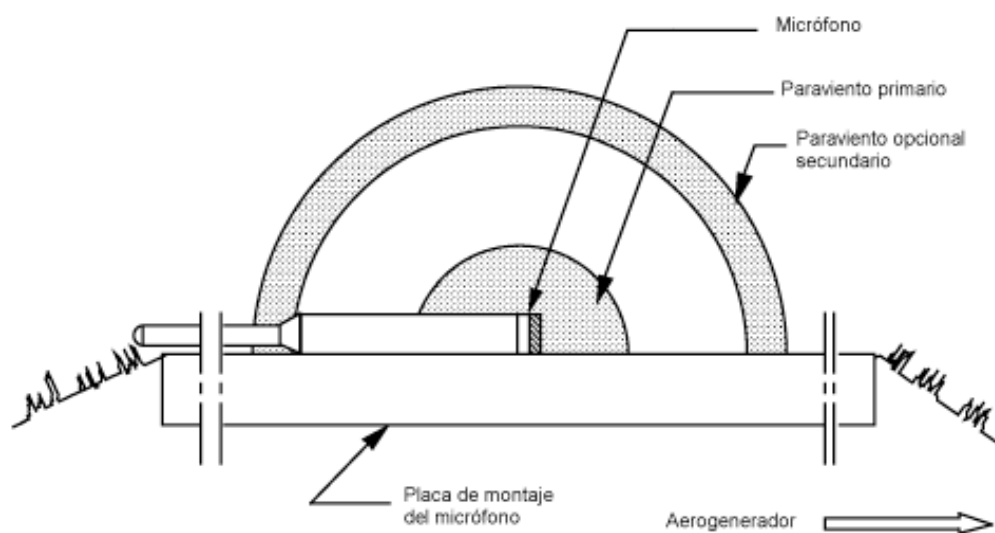


Figura 5.5b: Montaje del micrófono – Sección transversal vertical.



Figura 5.6a: Fotografía de los micrófonos, paravientos primarios y la placa.



Figura 5.6b: Fotografía del paravientos secundario y la placa.

5.1.9 Software

PULSE™ Software Analyzer

PULSE™ es una plataforma creada por Brüel&Kjær que ha sido desarrollada como una solución avanzada para la medición de sonido y de vibraciones. Posee una amplia gama de aplicaciones de software y configuraciones lo que le otorga un carácter muy versátil. Los subprogramas de PULSE que hemos utilizado en este proyecto han sido:

- PULSE LabShop
- PULSE Sound Quality
- PULSE Reflex

Características PULSE LabShop

Tiempo real

La capacidad en tiempo real de PULSE LabShop es la relación más cercana posible entre causa y efecto, es decir, se pueden ver los resultados del análisis de forma instantánea en la pantalla en el momento en que se miden, lo que permite validar los datos inmediatamente.

Multi-análisis

La parte multi-análisis de PULSE LabShop permite realizar análisis FFT, 1/n de octava (CPB) y un análisis general de manera simultánea en los mismos o en diferentes canales/señales mientras que muestra los resultados en tiempo real en la pantalla.

Basado en PC

PULSE LabShop te da la libertad para hacer las mediciones de campo y procesar los datos siempre que lo desees. PULSE LabShop hace de un PC, un analizador personal al

aprovechar el alto rendimiento que ofrece el microprocesador para el procesamiento de señales en tiempo real.

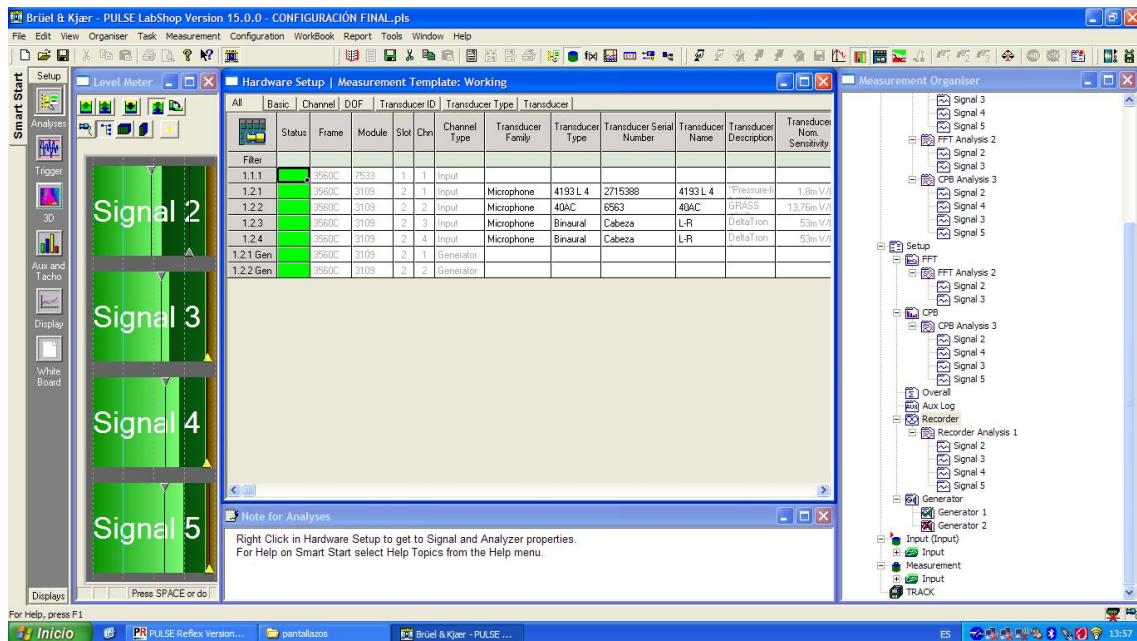


Figura 5.7: Captura de pantalla de PULSE LabShop.

Características PULSE Sound Quality

PULSE TM Sound Quality basado en Windows es el núcleo del sistema de análisis de la calidad del sonido. El software es rápido y fácil de usar, lo que ahorra tiempo y dinero. Proporciona una interfaz directa asegurando una solución completa para la evaluación de la calidad del sonido.

La automatización OLE (ActiveX TM) proporciona un medio de controlar el software Sound Quality desde otras aplicaciones. La automatización OLE es una herramienta que integra de manera eficiente otros paquetes de software, incluyendo PULSE, dándole una mayor eficiencia y capacidad de repetición de la configuración del sistema. La automatización OLE también permite la personalizaciones de usuario, tales como la creación de macros para las operaciones repetitivas que pueden ser necesarios para aplicaciones de control de calidad. También se puede personalizar las lecturas del cursor.

Filtros en tiempo real ofrecen la posibilidad de edición con filtros similares a los filtros analógicos clásicos. Cuando la forma del filtro se cambia con el cursor, inmediatamente afecta a la reproducción del archivo de sonido.

Con PULSE portable, mediante las grabaciones de los datos en formato .DAT el archivo puede ser leído por el software del tipo 7698 y puede ser transformado en archivos WAV para un manejo más fácil.

Otras característica destacable es que los parámetros de Zwicker como la sonoridad y los niveles ponderados A, se pueden mostrar en función de las RPM. Este análisis puede ser empleado para cuantificar las fluctuaciones y modulaciones.

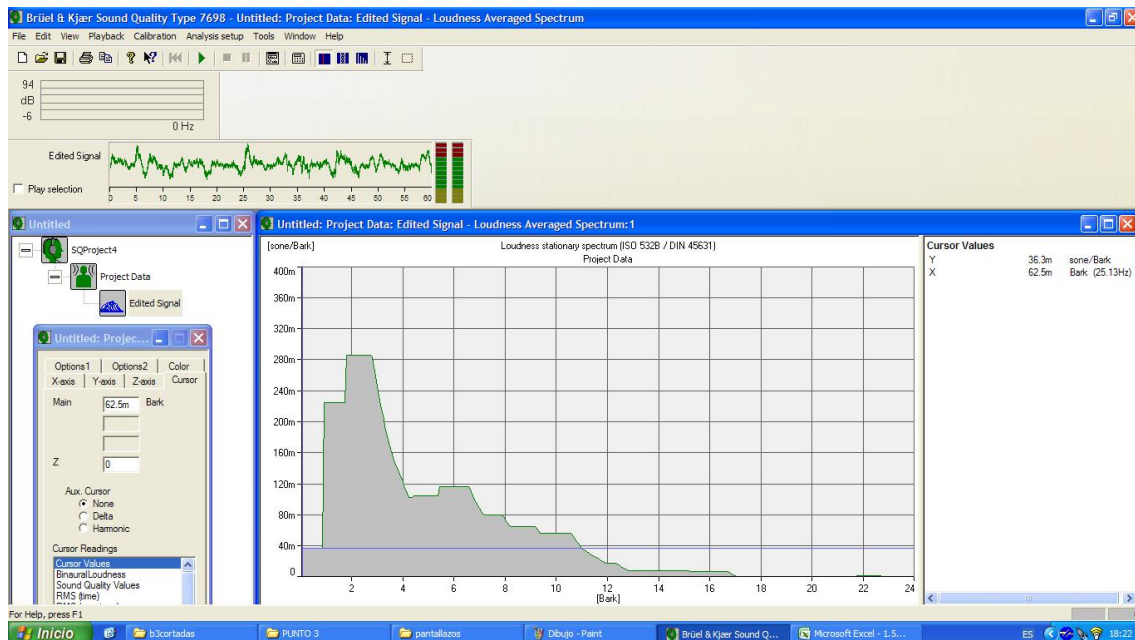


Figura 5.8: Captura de pantalla de PULSE Sound Quality.

Características PULSE Reflex

Diseñado en estrecha colaboración con los usuarios finales de diversos sectores de la industria en todo el mundo, PULSE Reflex tiene la facilidad de uso y conceptos de alta productividad. PULSE Reflex le ofrece:

- Interfaz de usuario intuitiva

- Poderoso gestor de datos
- Mejora la presentación de informes

Interfaz de usuario intuitiva

PULSE Reflex es muy funcional, las operaciones relacionadas se agrupan en las regiones dedicadas de la pantalla y el usuario controla si se ve o está oculto para dar atención máxima y espacio de pantalla para cualquier tarea que se realiza.

PULSE Reflex ofrece una sección de notas versátil, pero fácil de usar que permite al usuario grabar cada pensamiento que se produce. Además, es posible incluir sonidos, fotografías o vídeos y enlaces a los artículos del proyecto para proporcionar un recuerdo duradero de cómo o por qué se tomaron ciertas decisiones.

Poderoso gestor de datos

De la solución de problemas hasta pruebas rutinarias, PULSE Reflex ofrece alta eficiencia, alta productividad y resultados de alta calidad. El software permite la navegación rápida a través de grandes volúmenes de datos, filtrado rápido o la clasificación de datos para su posterior procesamiento como el análisis estadístico, análisis en frecuencia o de estimación de parámetros modales.

Mejora la presentación de informes

Los informes realizados con PULSE Reflex aumentan la productividad ya que se pueden realizar rápidamente y sin esfuerzo. Tanto si el informe oficial es por escrito, o al estilo de presentación, o mediante hoja de cálculo, se puede vincular pantallas, resultados, multimedia y notas del proyecto para los clientes.

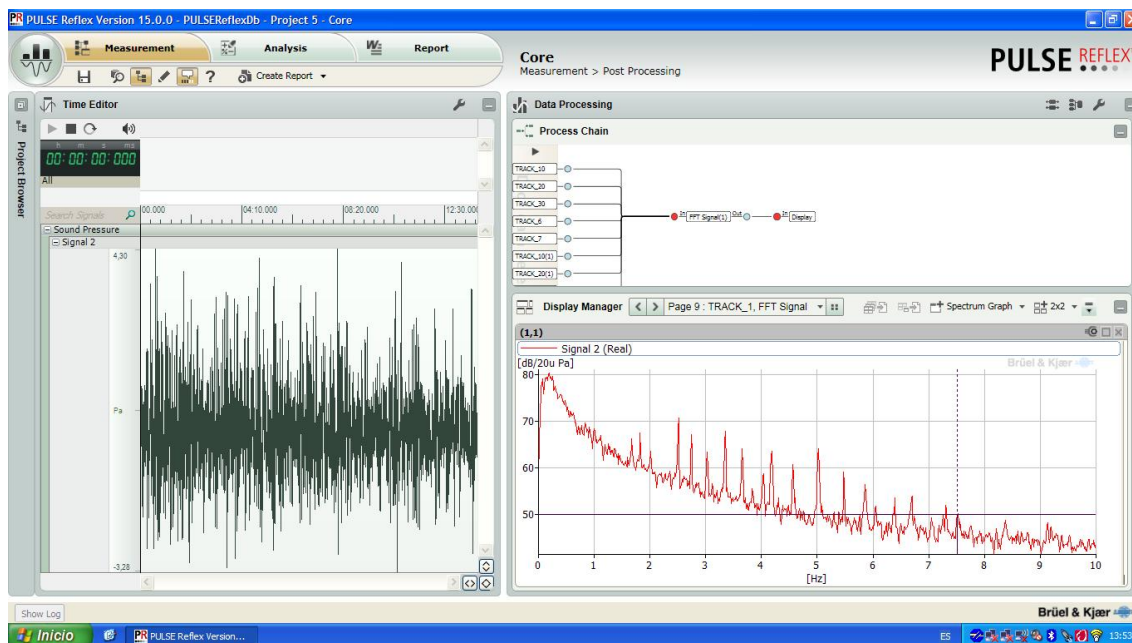


Figura 5.7: Captura de pantalla de PULSE LabShop.

5.2 Especificaciones técnicas de los aerogeneradores

AW-1500

AEROGENERADOR

Información técnica

	AW-70/1500	AW-77/1500	AW-82/1500
Diámetro de rotor	70 m	77 m	82 m
Clase de viento (IEC)	IEC Ia	IEC IIa	IEC IIIB

DATOS DE FUNCIONAMIENTO

Velocidad viento de arranque	4 m/s	3,5 m/s	3,0 m/s
Velocidad viento nominal	11,6 m/s	11,1 m/s	10,5 m/s
Velocidad viento de parada	25 m/s		20 m/s
Potencia nominal	1.500 kW		

DATOS DE COMPONENTES

Número de palas	3		
Orientación	Barlovento		
Diámetro	70,062 m	76,662 m	82 m
Área barrida	3.855,27 m²	4.615,83 m²	5.289 m²
Sentido de giro	Horario		
Velocidad nominal de rotación	20,2 rpm	18,3 rpm	16,7 rpm
Regulación de potencia control de sobrevelocidad	Giro de pala desde posición de bandera hasta máxima resistencia al viento		
Ángulo inclinación del rotor sobre horizontal	5°		
Velocidad nominal de punta de pala	74,1 m/s	73,9 m/s	71,7 m/s
Ángulo de conicidad	0°		

PALAS

Modelo	34.0	37.3	40.3
Material	GFRP		
Longitud total	34,0 m	37,3 m	40,3 m
Peso	5.160 kg / pala	5.522 kg / pala	5.780 kg / pala
Paso de pala	Longitud total de pala		
Freno aerodinámico	A posición de bandera		

BUJE

Tipo	Rígido		
Material	Fundición GJS 400 18U LT		
Protección	Metalizado Zn + Epoxy		

SISTEMA PASO DE PALA

Rodamientos	Doble hilera, cuatro puntos de contacto		
Accionamiento	Hidráulico		
Mecanismo	Cilindros hidráulicos		
Seguridad	Acumuladores en buje		

TREN DE POTENCIA

Multiplicadora	3 etapas: 2 planetario / helicoidal		
Potencia nominal multiplicadora	1.500 kW		
Relación de transmisión	1:59 (50 Hz)/1:71 (60 Hz)	1:65 (50 Hz)/1:78 (60 Hz)	
Velocidad nominal de entrada	20,2 rpm	18,3 rpm	16,7 rpm
Velocidad nominal de salida	1.200 (50 Hz)/1.440 (60 Hz)	1.100 (50 Hz)/1.320 (60 Hz)	
Lubricación	Por salpicado o bomba de recirculación, intercambio aceite/aire y filtro de aceite		
Volumen de aceite multiplicadora	270 litros		
Condition monitoring system	Incluido		

EJE LENTO

Tipo	Eje forjado hueco		
Material	34 Cr Ni Mo 6		
Soporte	2 rodamientos		

RODAMIENTOS EJE

Tipo	Doble hilera rodillos esféricos		
------	---------------------------------	--	--

FRENO DE PARKING

Tipo	Disco con dos pinzas de freno		
Emplazamiento	Eje alta velocidad		

SISTEMA DE GIRO

Tipo	Cuatro puntos de contacto		
Corona dentada	Exterior		
Relación piñón reductor/corona	11,6:1		
Sistema de frenado	Disco y pinzas de freno		

MOTOREDUCTORAS ORIENTACIÓN

Tipo	4 etapas planetarias		
Ratio	1:1451		
Velocidad de giro de góndola	0,08 rpm		
Tipo de motor	Asíncrono, cuatro polos		
Voltaje/Frecuencia	230 / 400 V - 50 Hz		
Número de motorreductoras	4 x 1,5 kW		

GRUPO HIDRÁULICO

Tipo de motor	18,5 kW		
Voltaje/Frecuencia	380 V/50 Hz		

GENERADOR

Tipo	6 polos, doble alimentación		
Clase de aislamiento (stator / rotor)	H / H		
Potencia	1.500 kW		
Grado de protección	IP 54		
Frecuencia	50 / 60 Hz		
Voltaje	12.000 V		
Rango de velocidades	770-1.300 rpm 50 (Hz) 920-1.560 rpm 60 (Hz)	770-1.200 rpm 50 (Hz) 920-1.440 rpm 60 (Hz)	

SISTEMA DE CONTROL

Tipo	Ingecon-W		
Procesador	80 – 386,32 bits		
Interfaz scada	OPMT		
Corrección de factor de potencia	Programable mediante software		

TORRE

Material	Tubular de acero para 60 m 71,5 m y 80 m de altura de buje		
Altura de torre (bujes a 60 / 80 m)	56,9 m / 76,9 m		
Acceso a torre	Puerta con cerradura de seguridad		
Acceso a barquilla	Escalera o elevador		
Peso (de acero 60 / 80 m de buje)	95 t / 135 t		
Peso (de hormigón, buje 80 m)	511 t		
Unión a cimentación	Barras de anclaje embebidas en la cimentación y mortero de alta resistencia		

PESOS

Barquilla	52,5 t		
Barquilla + buje	67,5 t		

DIMENSIONES BARQUILLA + BUJE

Longitud	12,5 m		
Anchura	4,2 m		
Altura	4,0 m		

AW-3000

AEROGENERADOR

Información técnica

	AW-100/3000	AW-109/3000	AW-116/3000
Diámetro de rotor	100 m	109 m	116 m
Clase de viento (IEC)	IEC Ia	IEC IIa	IEC IIIa

DATOS DE FUNCIONAMIENTO

Velocidad viento de arranque	4 m/s	3,5 m/s	3 m/s
Velocidad viento nominal	11,7 m/s	11,1 m/s	10,6 m/s
Velocidad viento de parada	25 m/s		20 m/s
Potencia nominal	3.000 kW		

DATOS DE COMPONENTES

Número de palas	3		
Orientación	Barlovento		
Diámetro	100 m	109 m	116 m
Área barrida	7.864 m ²	9.331 m ²	10.568 m ²
Sentido del giro	Horario		
Velocidad nominal de rotación	14,2 rpm	13,2 rpm	12,3 rpm
Regulación de potencia control de sobrevelocidad	Giro de pala desde posición de bandera hasta máxima resistencia del viento		
Ángulo inclinación del rotor sobre horizontal	5°		
Velocidad nominal de punta de pala	74,3 m/s	74,7 m/s	74,7 m/s
Ángulo de conicidad	3°		

PALAS

Modelo	48.8	53.2	56.7
Material	GFRP		
Longitud total	48,8 m	53,2 m	56,7 m
Peso	10.400 kg/pala	11.540 kg/pala	12.280 kg/pala
Paso de pala	Longitud total de pala		
Freno aerodinámico	A posición de bandera		

BUJE

Modelo	Rígido
Material	Fundición CJS 400 18U LT
Protección	Metalizado Zn + Epoxi

SISTEMA PASO DE PALA

Rodamientos	Doble hilera, cuatro puntos de contacto
Accionamiento	Hidráulico
Mecanismo	Cilindros hidráulicos
Seguridad	Acumuladores en buje

TREN DE POTENCIA

Multiplicadora	3 etapas: 2 planetario/helicoidal		
Potencia nominal multiplicadora	3.000 kW		
Relación de transmisión	1:77	1:83	1:89
Velocidad nominal de entrada	14,2 rpm	13,1 rpm	12,3 rpm
Velocidad nominal de salida	1.100 rpm		
Lubricación	Por salpicado y bomba de recirculación, intercambiador aceite/aire y filtro de aceite		
Volumen de aceite multiplicadora	600 litros		
Condition Monitoring System	Incluido		

EJE LENTO

Tipo	Eje forjado hueco
Material	34 Cr Ni Mo 6
Soporte	2 rodamientos

RODAMIENTOS EJE

Tipo	Doble hilera rodillos esféricos
------	---------------------------------

FRENO DE PARKING

Tipo	Disco con dos pinzas de freno
Emplazamiento	Eje alta velocidad

SISTEMA DE GIRO

Tipo	Cuatro puntos de contacto
Corona dentada	Exterior
Relación piñón reductor / corona	11,21:1
Sistema de frenado	Disco y pinzas de freno

MOTORREDUCTORAS ORIENTACIÓN

Tipo	5 etapas planetarias
Ratio	1:1451
Velocidad de giro de góndola	0,08 rpm
Tipo de motor	Asíncrono, cuatro polos
Voltaje / frecuencia	230 / 400 V - 50 Hz
Número de motorreductoras	6

GRUPO HIDRÁULICO

Voltaje / Frecuencia	380 V / 50Hz
----------------------	--------------

GENERADOR

Tipo	6 polos, doble alimentación
Clase de aislamiento (stator / rotor)	H/H
Potencia	3.000 kW
Grado de protección	IP 54
Frecuencia	50 / 60Hz (disponible)
Voltaje	12.000 V
Rango de velocidades	770-1.320 rpm 50 (Hz) / 924-1.584 rpm 60 (Hz)

SISTEMA DE CONTROL

Tipo	Ingecon-W
Procesador	80 – 386,32 bits
Interfaz Scada	OPMT
Corrección de factor de potencia	Programable por software

TORRE

Material	Hormigón
Altura de torre (bujes a 100 / 120 m)	98,2 m / 118,2 m
Acceso a torre	Puerta con cerradura de seguridad
Acceso a barquilla	Escalera o elevador
Peso (bujes a 100 / 120 m)	850 t / 1.100 t
Unión a cimentación	Barras de anclaje, embebidas en la cimentación y mortero de alta resistencia

PESOS

Góndola	118 t
Rotor (100 m)	66 t
Barquilla + buje	154 t

DIMENSIONES BARQUILLA + BUJE

Longitud	17,5 m
Anchura	4,5 m
Altura	4 m

SISTEMA DE ENGRASE AUTOMÁTICO

Rodamientos	Pitch, sistema de giro, eje principal y generador
-------------	---

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como ya se ha descrito en apartados anteriores se llevaron a cabo cuatro mediciones en tres días diferentes, 12 de agosto, 28 de septiembre y 7 de octubre. A partir de estas mediciones se han obtenido los diferentes resultados que se exponen en este apartado.

Los resultados aquí presentados corresponden a las grabaciones realizadas con el micrófono tipo 4193 de Brüel&Kjær, ya que es el único micrófono de los utilizados que es capaz de registrar con la máxima fidelidad todo el rango frecuencial estudiado (0 Hz – 20 KHz). El micrófono G.R.A.S.S, se ha utilizado para obtener la correlación con los demás micrófonos, el primer día de medida con el 4193 obteniéndose resultados positivos, los restantes días se correlacionó con la cabeza binaural sin obtener resultados aceptables.

En cuanto a los datos obtenidos con los micrófonos correspondientes a la cabeza binaural, se han dado por nulos ya que en ninguno de los casos se obtenían relaciones señal-ruido buenas ($>6\text{dB}$) ni aceptables ($>3\text{dB}$), probablemente este efecto es debido a que no se dispuso de un paravientos adecuado y a la altura donde se colocó la cabeza.

El sonómetro únicamente se utilizó para correlacionar las medidas registradas con el micrófono tipo 4193 durante el día 28 de septiembre.

6.1 Parámetros acústicos

6.1.1 Dependencia del viento

El viento es un gran condicionante para que se produzcan niveles de ruido elevados en las inmediaciones del parque, la mayor parte del ruido producido en el aerogenerador es ruido aerodinámico producido por el movimiento de la hélice y las palas chocando contra el viento. Esto significa que cuanto mayor es la velocidad del viento, mayor es el nivel de emisión de ruido aerodinámico del aerogenerador, ya que éste aumenta con la velocidad en punta de pala y la velocidad de rotación.

En este sentido, hemos analizado la variación del nivel equivalente con respecto a las velocidades de viento registradas durante la medida, con el objetivo de determinar si es cierto o no que el nivel de presión sonora (NPS) aumenta con la velocidad del viento. Hemos creído conveniente comparar, para cada uno de los dos aerogeneradores sometidos a estudio, los niveles equivalentes (L_{eq}) y velocidades de viento obtenidas en los diferentes días de medida y observar la tendencia. Para ello se han tenido en cuenta todas las bandas de tercio de octava desde 0,8 Hz hasta 20KHz.

Con respecto al aerogenerador tipo AW77/1500, las medidas se realizaron el 12 de agosto y el 28 de septiembre. Para cada tanda de medida se realizaron dos sesiones, donde se registraron los niveles producidos por el aerogenerador objeto de estudio (12_Agosto_ON y 28_Sept_ON) y los niveles de ruido de fondo (12_Agosto_RF y 28_Sept_RF), tal como se puede apreciar en las figuras 6.1.1 y 6.1.2. En ambas figuras se representa el NPS lineal, es decir, sin ponderación, donde se puede observar que aumenta ligeramente con respecto a la velocidad, llegando a un máximo de 2 dB de diferencia. Este efecto es aún más notorio para las mediciones realizadas el 12 de agosto, donde las velocidades de viento son en comparación bastante altas con respecto a las del 28 de Septiembre.

En el caso del aerogenerador tipo AW109/3000, las medidas fueron realizadas el 12 de agosto y el 7 de octubre. Al igual que en el caso anterior, se registraron tanto los niveles producidos por el aerogenerador (12_Agosto_ON y 7_Oct_ON), como los niveles de ruido de fondo (12_Agosto_RF y 7_Oct_RF). Como se puede apreciar en la figura 6.1.3, el NPS producido por el aerogenerador tiene una ligera tendencia negativa, es decir, que el nivel disminuye con respecto a la velocidad, con un máximo de 0.5 dB, lo cual es poco significativo. No ocurre lo mismo con el nivel de ruido de fondo ya que esta vez aumenta con la velocidad, pero sigue siendo poco relevante, ya que como máximo varía en 0.8 dB, según se muestra en la figura 6.1.4

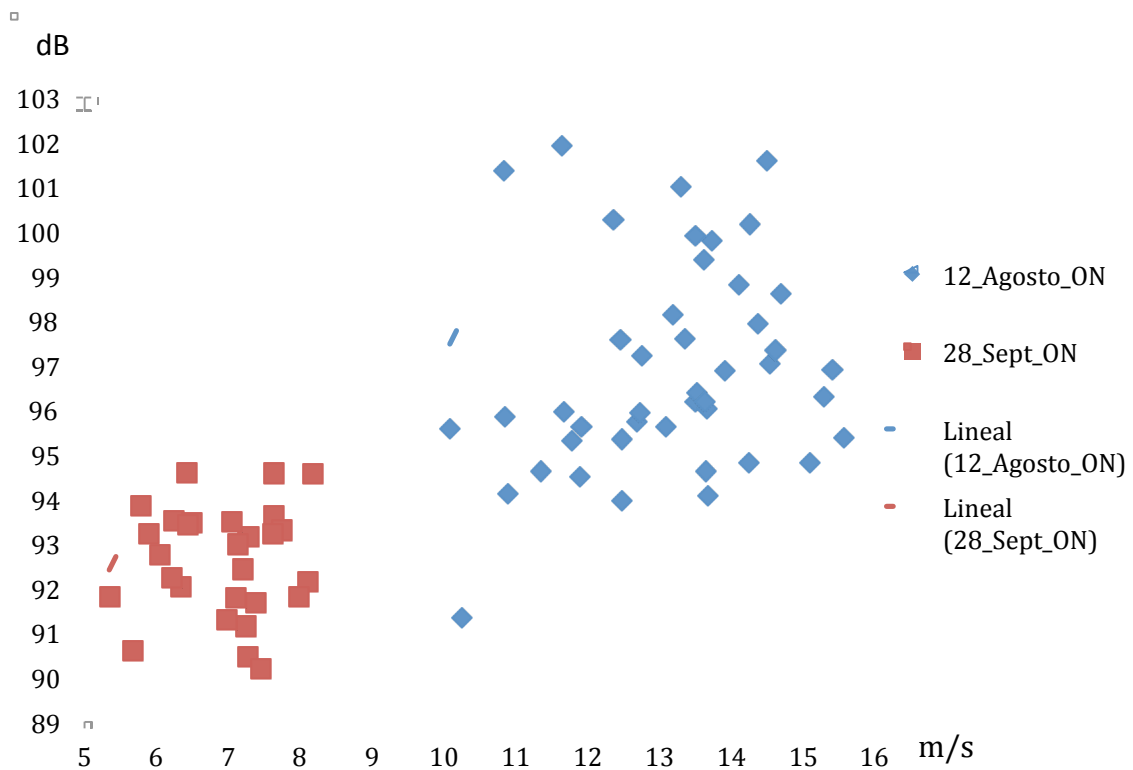


Figura 6.1.1: Niveles de presión sonora producidos por el aerogenerador AW77/1500 con respecto a las velocidades de viento.

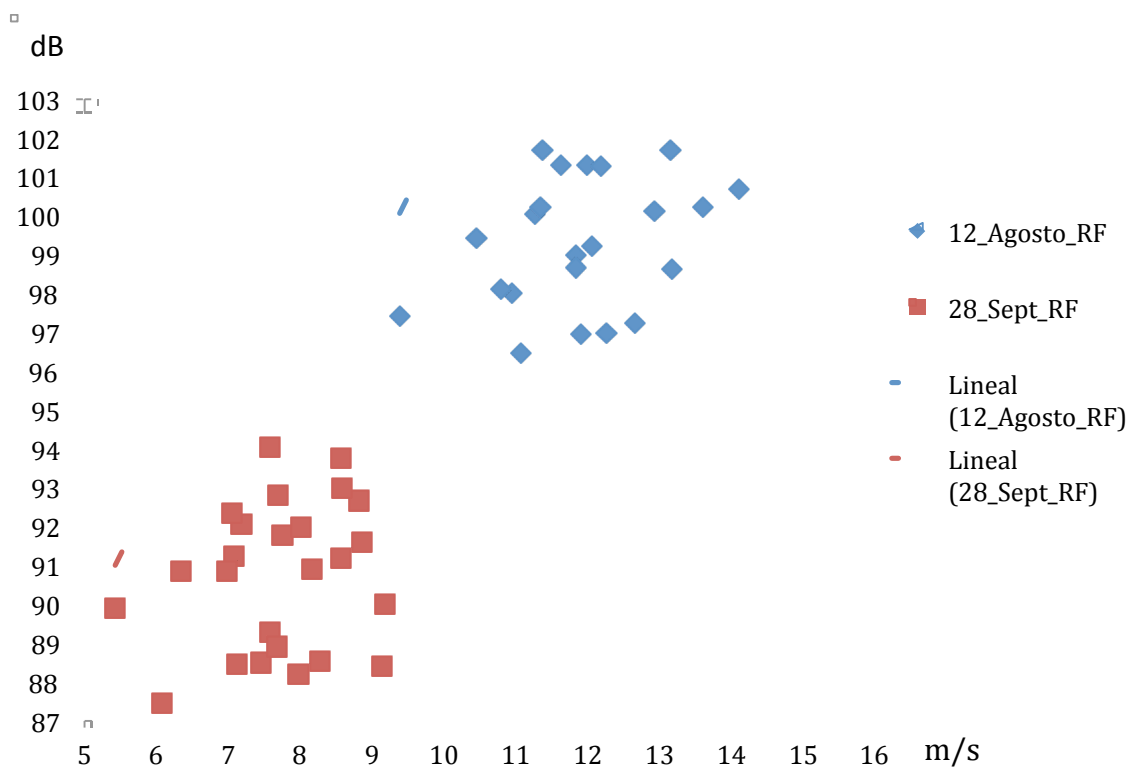


Figura 6.1.2: Niveles de presión sonora correspondientes al ruido de fondo con respecto a las velocidades de viento.

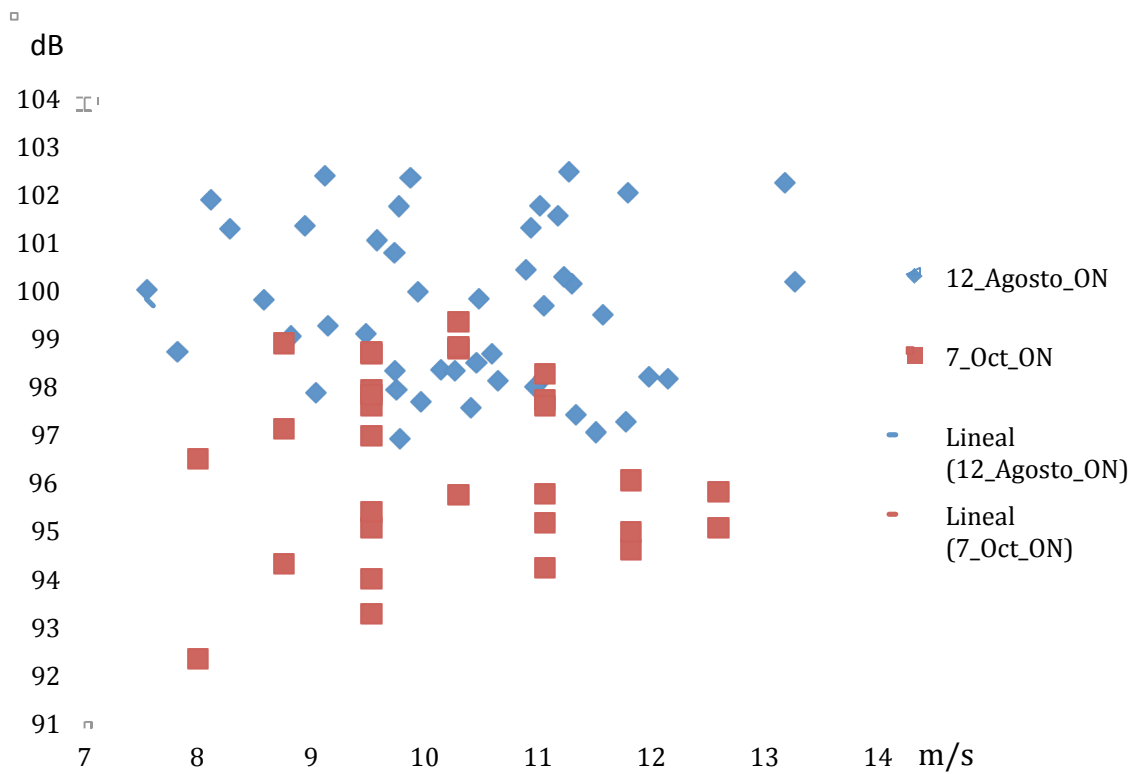


Figura 6.1.3: Niveles de presión sonora producidos por el aerogenerador AW109/3000 con respecto a las velocidades de viento.

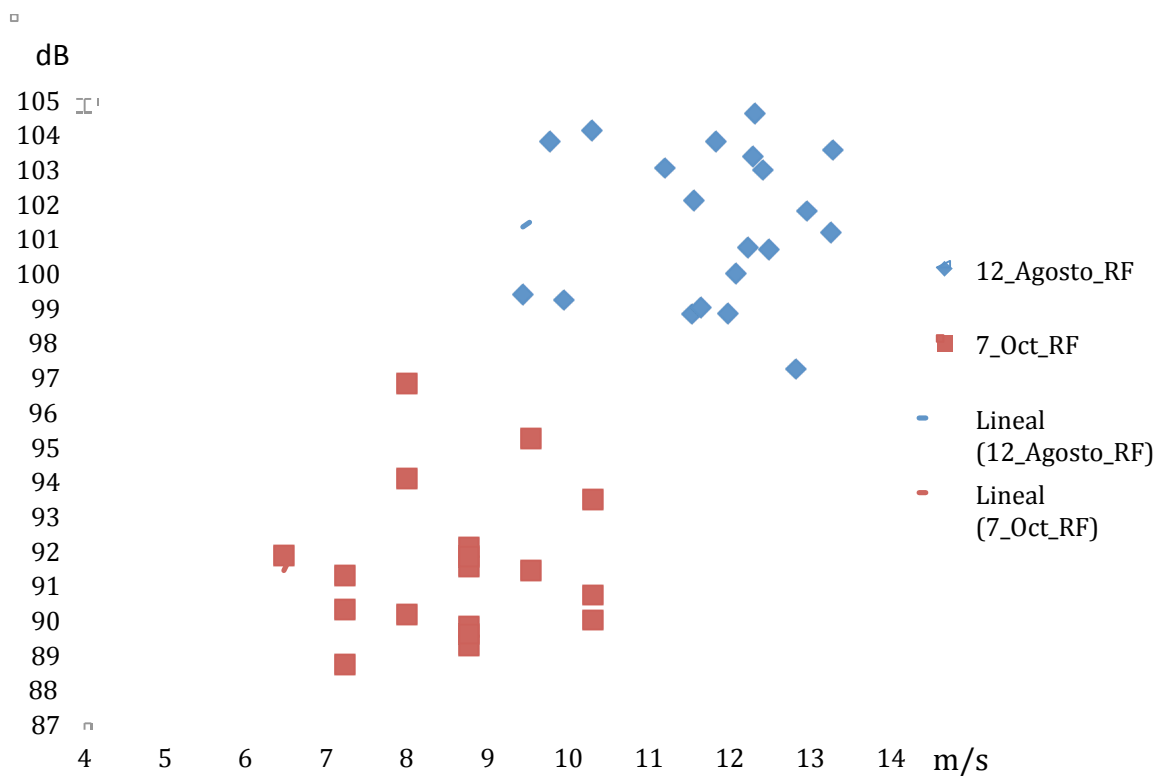


Figura 6.1.4: Niveles de presión sonora correspondientes al ruido de fondo con respecto a las velocidades de viento.

Cabe destacar que en el parque Peñablanca, los niveles de ruido de fondo difieren muy poco con respecto a los producidos por el molino. Este efecto se acentúa aún más en el caso de las mediciones del 12 de agosto ya que en ocasiones los niveles de ruido de fondo superan a los producidos por el molino

Resulta difícil concluir, a partir de estos datos, que el nivel sonoro aumenta con la velocidad ya que las velocidades de viento difieren para los diferentes días de medida. Lo que parece evidente es que para el aerogenerador más pequeño (AW77/1500) sí que existe una ligera tendencia positiva en relación con el viento, no siendo así para el de mayor tamaño (AW109/3000).

6.1.2 Espectro

Como segundo punto del análisis acústico, hemos querido analizar el NPS ponderado A con respecto a la frecuencia, es decir, hemos representado el espectro para diferentes velocidades de viento con el objetivo de observar como varía la percepción del oído humano con respecto a la velocidad del viento, y a la vez comparar los niveles producidos por la turbina con los del ruido de fondo.

Las gráficas que se van a presentar a continuación dan una idea de la distribución frecuencial del sonido producido por los aerogeneradores estudiados. Los dos modelos tienen un espectro de ruido caracterizado por componentes de baja y media frecuencia que hace que exista gran diferencia en el nivel global según que se mida en dB o en dBA. La componente de baja frecuencia es relativamente importante, al haber niveles altos en bandas de frecuencia por debajo de 160 Hz. También se observa que carecen de componentes impulsivas y tonos puros al no destacar ninguna banda sobre sus adyacentes.

En el caso del aerogenerador tipo AW77/1500, para las mediciones del 12 de agosto con la máquina en marcha, el espectro apenas varía a velocidades de viento que van desde los 10,24 m/s hasta los 15,41 m/s, tal como se muestra en la figura 6.1.4. En lo que respecta a los niveles de ruido de fondo, aunque las diferencias sean mayores, no se aprecian diferencias significativas que tengan relación alguna con la velocidad, la cual varía desde 10,45 m/s hasta 14,85 m/s, según se muestra en la figura 6.1.5.

Las diferencias entre el nivel producido por la máquina y el ruido de fondo son notables a partir de aproximadamente 40 Hz hasta unos 4 KHz, donde las diferencias de nivel llegan a ser como máximo de 14 dBA a la frecuencia de 300 Hz. Esto queda patente en la figura 6.1.6, donde se representa el espectro de cuatro velocidades de viento, dos de éstas coinciden con la máxima (15.09_ON) y mínima (10.08_ON) velocidad de viento con el aerogenerador en marcha, al igual que las otras dos se corresponden con la máxima (14.85_RF) y mínima (10.45_RF) velocidad de viento cuando se registraron los niveles de ruido de fondo.

De igual forma ocurre para las mediciones realizadas el 28 de septiembre, el espectro se mantiene prácticamente constante para las medidas con la máquina en marcha, cuando la velocidad del viento se sitúa entre 5,34 y 8,17 m/s, esto se puede comprobar analizando la figura 6.1.7. Para los niveles de ruido de fondo, al igual que en el caso anterior, su espectro se mantiene constante, salvo pequeñas diferencias que no muestran relación alguna con la velocidad según se muestra en la figura 6.1.8.

Como en el caso anterior las mayores diferencias las encontramos al comparar los espectros de los niveles correspondientes a la máquina con los de ruido de fondo, pero con la diferencia de que empiezan a ser notables a partir de unos 12 Hz, con un máximo de 13 dBA a la frecuencia de 200 Hz. En la figura 6.1.9 se representan las velocidades máxima (8.17_ON) y mínima (5.34_ON) para los niveles producidos por el aerogenerador como para los niveles de ruido de fondo (9.18_RF y 6.07_RF), donde se pueden apreciar diferencias de nivel de hasta 12 dBA.

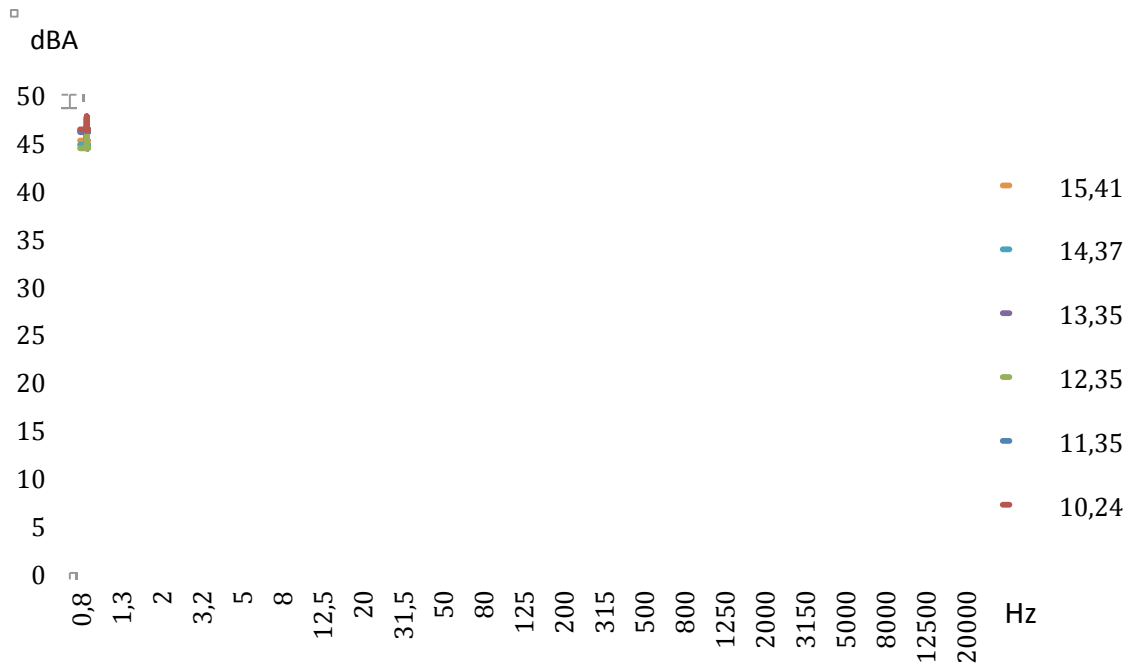


Figura 6.1.4: Espectro del NPS con maquina funcionando.

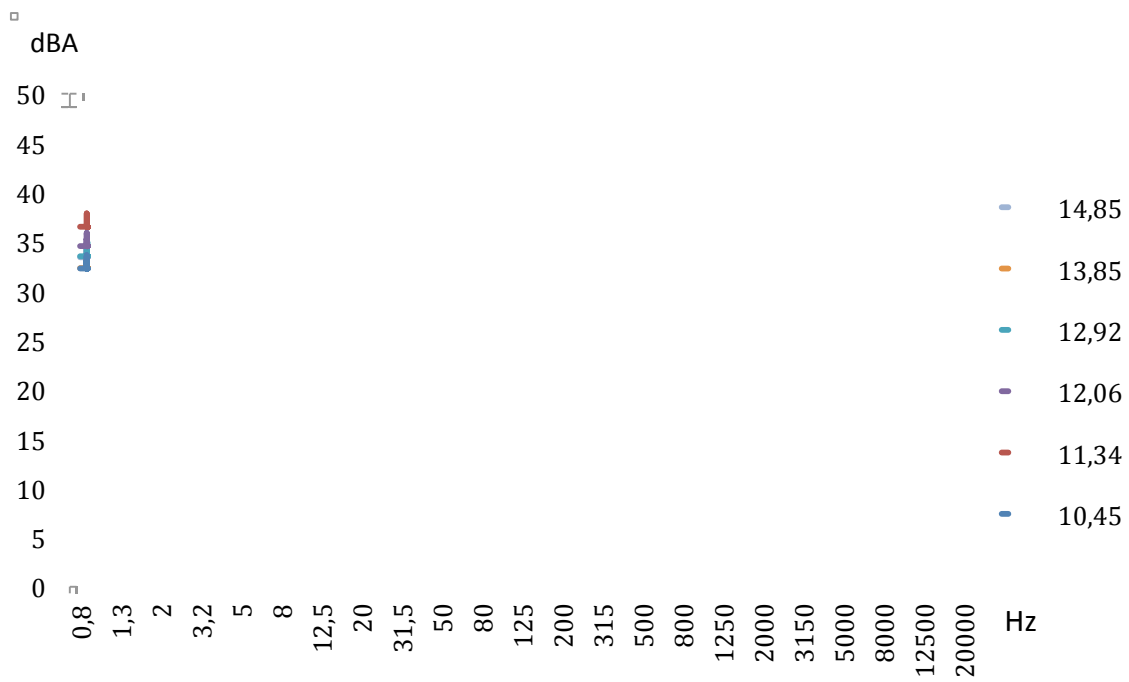


Figura 6.1.5: Espectro del NPS del ruido de fondo.

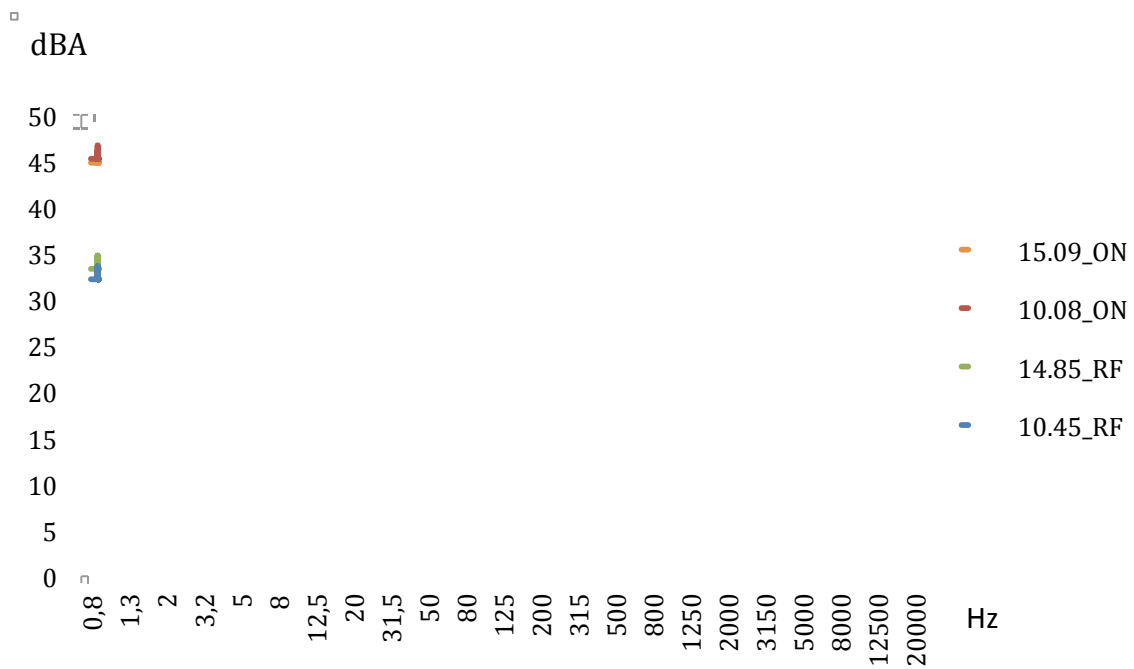


Figura 6.1.6: Comparación de espectros.



Figura 6.1.7: Espectro del NPS con maquina funcionando.

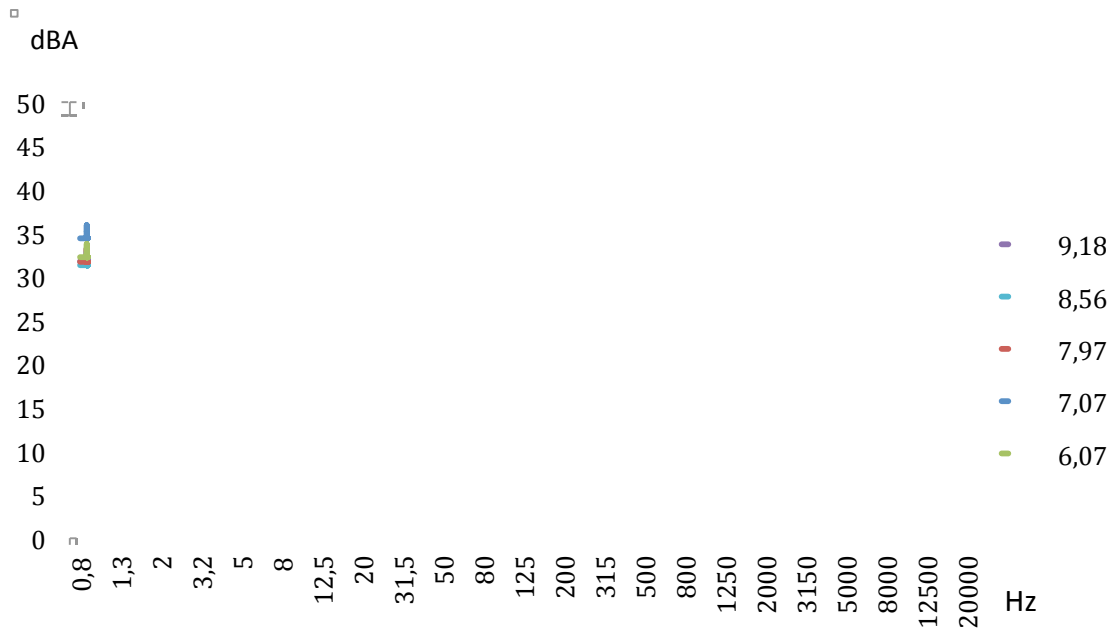


Figura 6.1.8: Espectro del NPS del ruido de fondo.

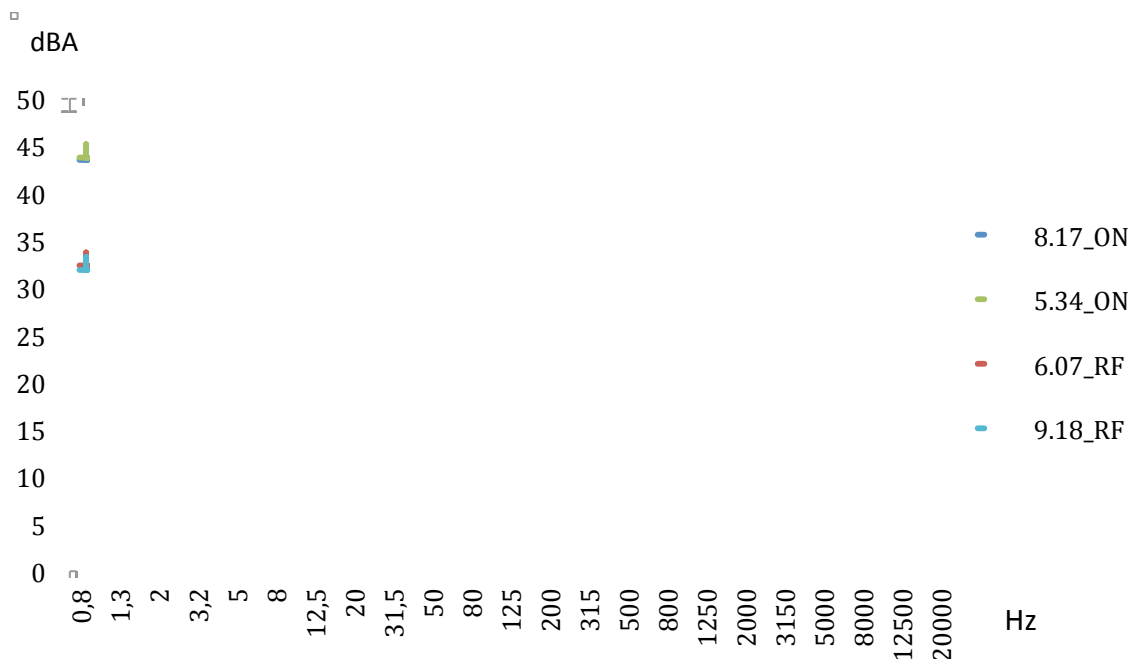


Figura 6.1.9: Comparación de espectros.

Teniendo en cuenta que las mediciones realizadas el 12 de agosto se realizaron sin paravientos secundario, y observando las graficas de ambos días, se puede apreciar que el NPS cae más rápidamente a partir de unos 500 Hz para la sesión del 28 de septiembre, lo que refleja el aislamiento que produce el paravientos a frecuencias

relativamente altas. También podemos achacar al paravientos el hecho de que, a frecuencias bajas, en la mediciones del 28 de septiembre, se aprecian diferencias en torno a 5 dB desde aproximadamente 12,5 Hz hasta unos 60 Hz, mientras que en las del 12 de agosto no se observa diferencia alguna.

En el caso de las mediciones del aerogenerador tipo AW109/3000, las gráficas 6.1.10, 6.1.11 y 6.1.12, muestran los mismos resultados que para el aerogenerador tipo AW77/1500, salvo que además de poseer niveles superiores, las diferencias entre el NPS, en dBA, producido por la maquina y ruido de fondo son inferiores. Este efecto se hace más visible para el caso de las mediciones del 12 de agosto, esta diferencia llega a ser de 8 dBA como máximo a una frecuencia de 300 Hz, mientras que para las mediciones del 7 de octubre, imágenes 6.1.13, 6.1.14 y 6.1.15, la diferencia sube hasta 10 dBA, a una frecuencia de 250 Hz. Además, resaltar que el espectro presenta mayor contenido de media-alta frecuencia.

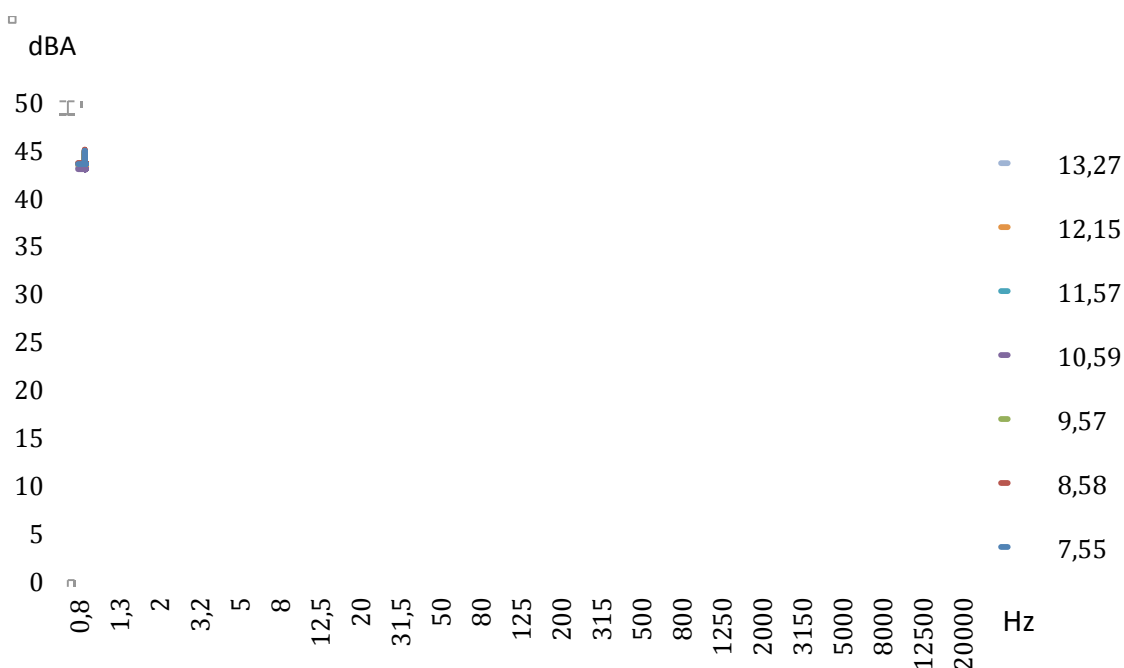


Figura 6.1.10: Espectro del NPS con maquina funcionando.

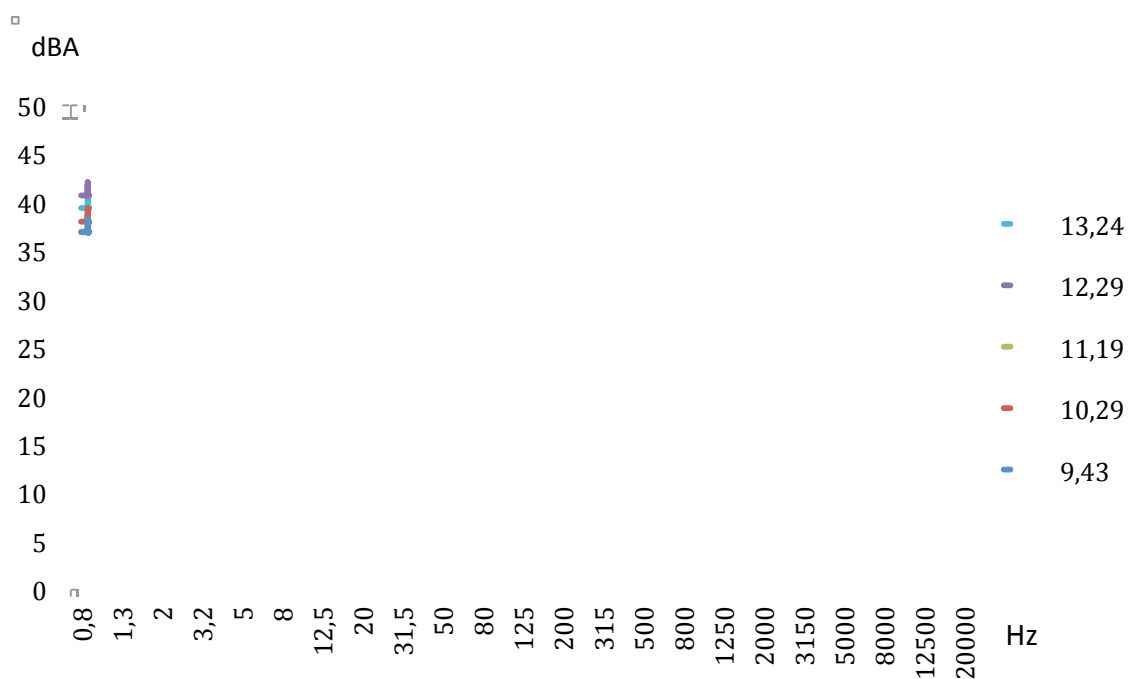


Figura 6.1.11: Espectro del NPS del ruido de fondo.

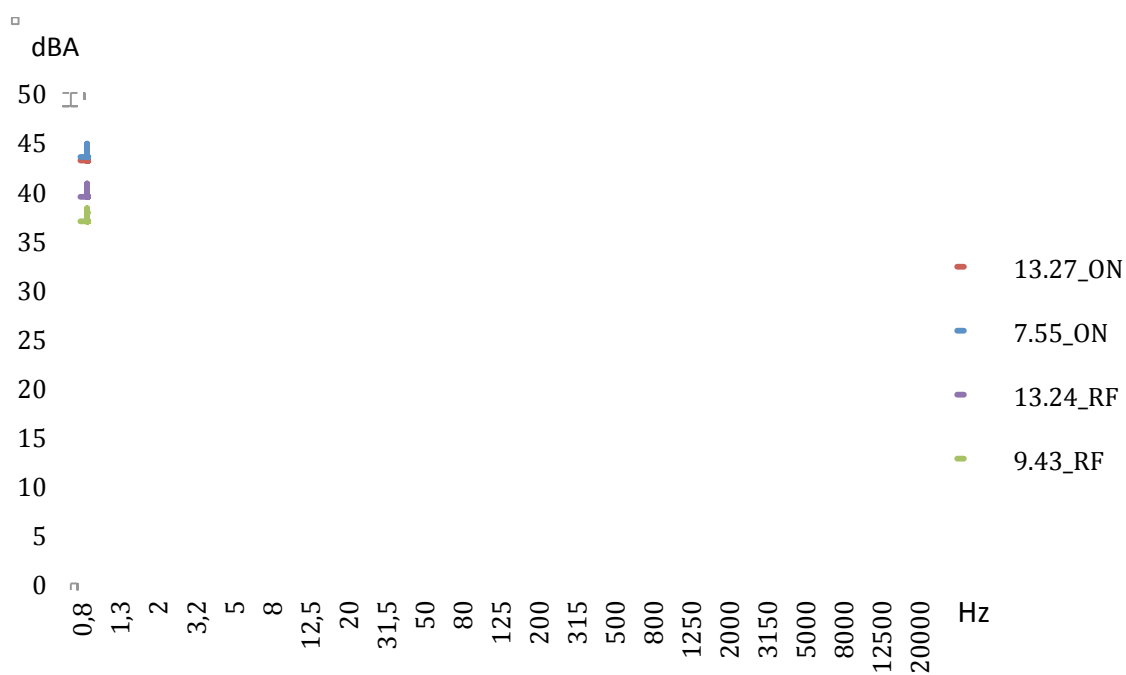


Figura 6.1.12: Comparación de espectros.

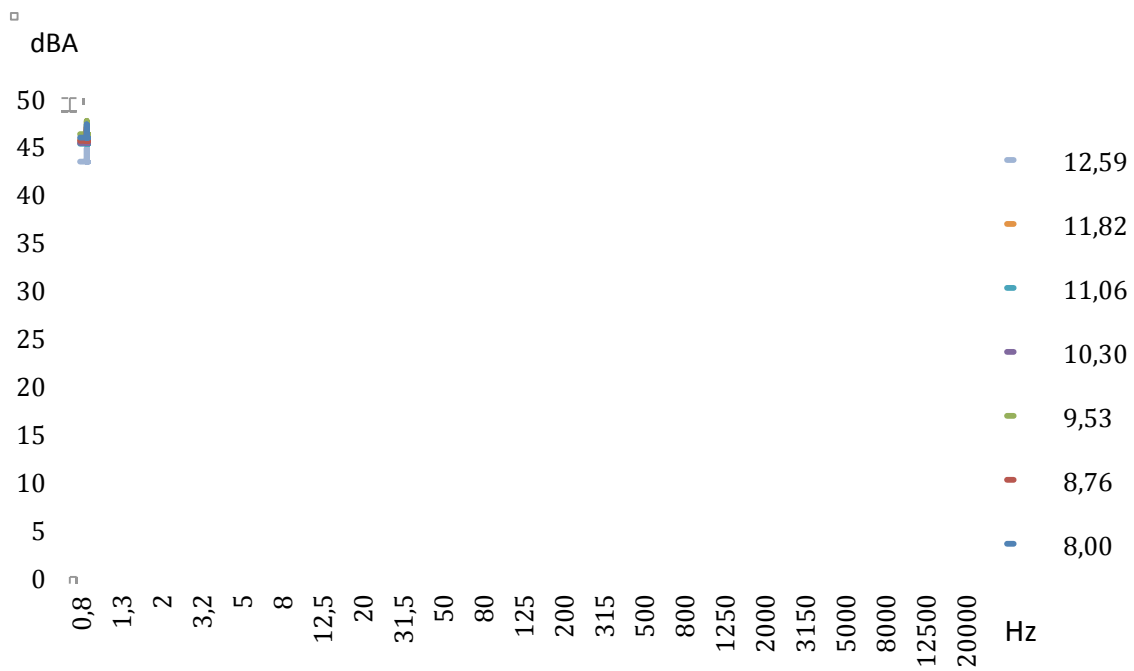


Figura 6.1.13: Espectro del NPS con maquina funcionando.

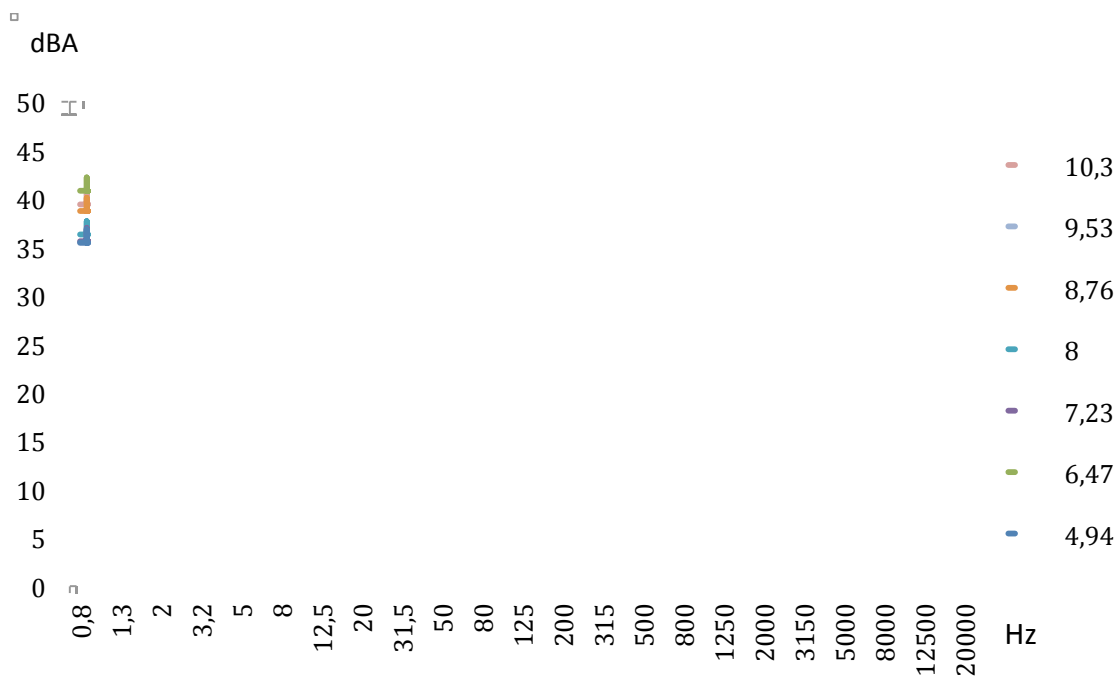


Figura 6.1.14: Espectro del NPS del ruido de fondo

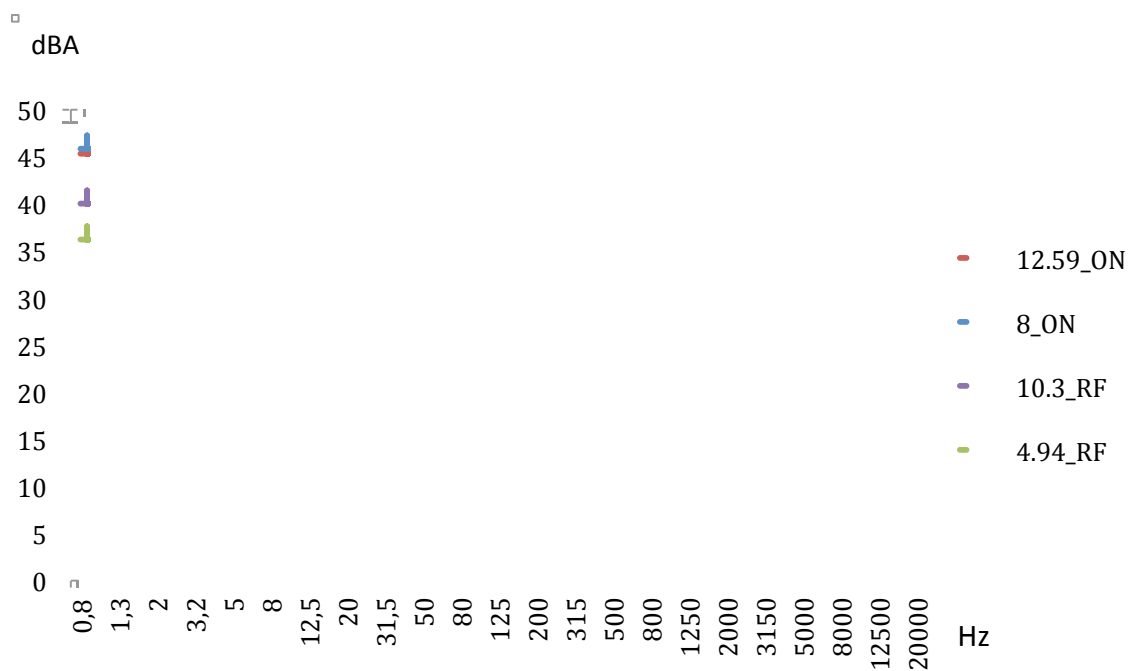


Figura 6.1.15: Comparación de espectros.

6.1.3 FFT

Continuando con el tercer punto del análisis, hemos representado la FFT de gran resolución con el objetivo de poder visualizar la frecuencia de paso de pala de ambos aerogeneradores y comprobar si es cierto o no que cuando más de un aerogenerador está cerca del punto de recepción, la frecuencia de modulación puede variar ya que cualquiera de las máquinas no tienen porqué girar a la misma frecuencia. La amplitud de la modulación también puede variar si el sonido de los aerogeneradores comienza a sonar conjuntamente.

A continuación se presentan una serie de gráficos donde se pueden apreciar dichos fenómenos. El caso más claro se ha obtenido con el aerogenerador tipo AW77/1500, donde se puede apreciar claramente la frecuencia de paso de pala, tanto para los niveles de ruido de fondo como para los niveles producidos por la máquina. En la figura 6.1.16 se muestra la FFT del ruido de fondo para dicho modelo, donde no se puede apreciar la frecuencia fundamental, debido al alto nivel sonoro a frecuencias muy bajas, pero sí sus armónicos. El primer armónico es claramente visible a la frecuencia de 1.67 Hz, el siguiente a la frecuencia de 2.51 Hz, lo que nos lleva a deducir que la frecuencia fundamental es de 0.84 Hz.

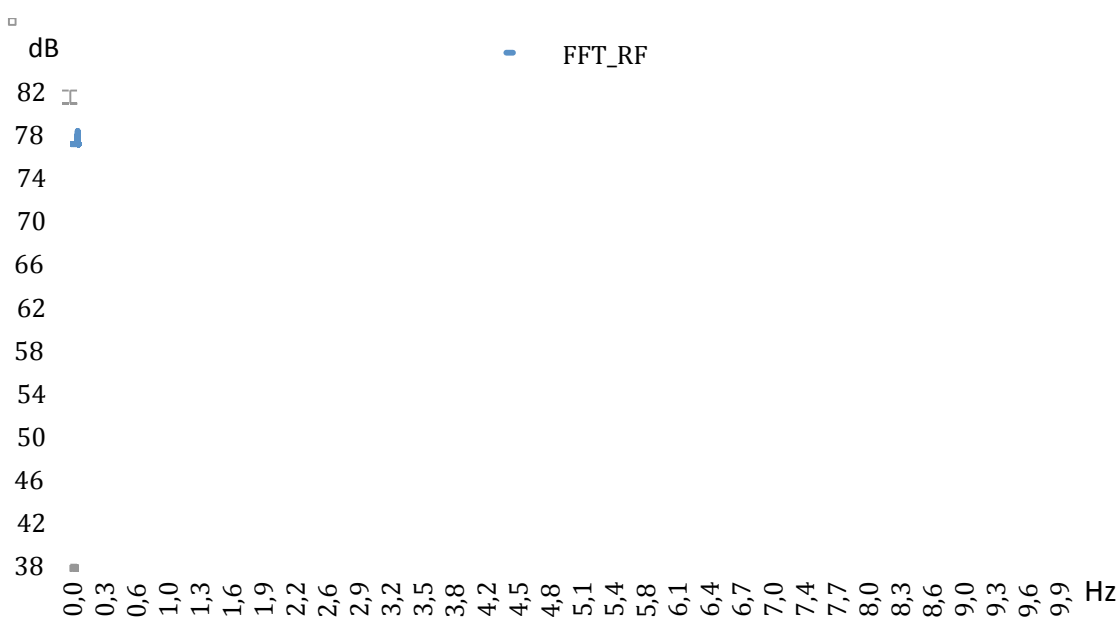


Figura 6.1.16: FFT del ruido de fondo del aerogenerador tipo AW77/1500

En la figura 6.1.17 se ha representado la FFT de los niveles sonoros producidos por la máquina. En este gráfico se pueden apreciar los armónicos de dos frecuencias fundamentales, lo cual pone de manifiesto que no todos los molinos del parque Moncayuelo giraban a la misma frecuencia. Una de estas frecuencias corresponde completamente con la de ruido de fondo, según se muestra en la figura 6.1.18. La otra, es ligeramente superior y su primer armónico se encuentra a la frecuencia de 1.83 Hz y el segundo a 2.74 Hz, lo que sugiere una frecuencia fundamental de 0.91 Hz.

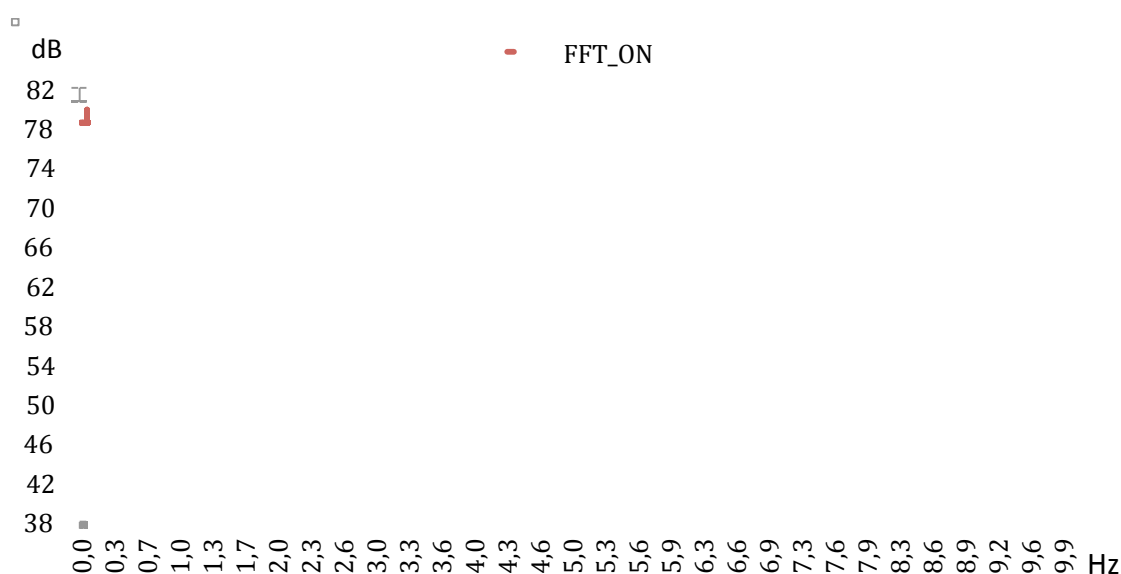


Figura 6.1.17: FFT del ruido del aerogenerador tipo AW77/1500.

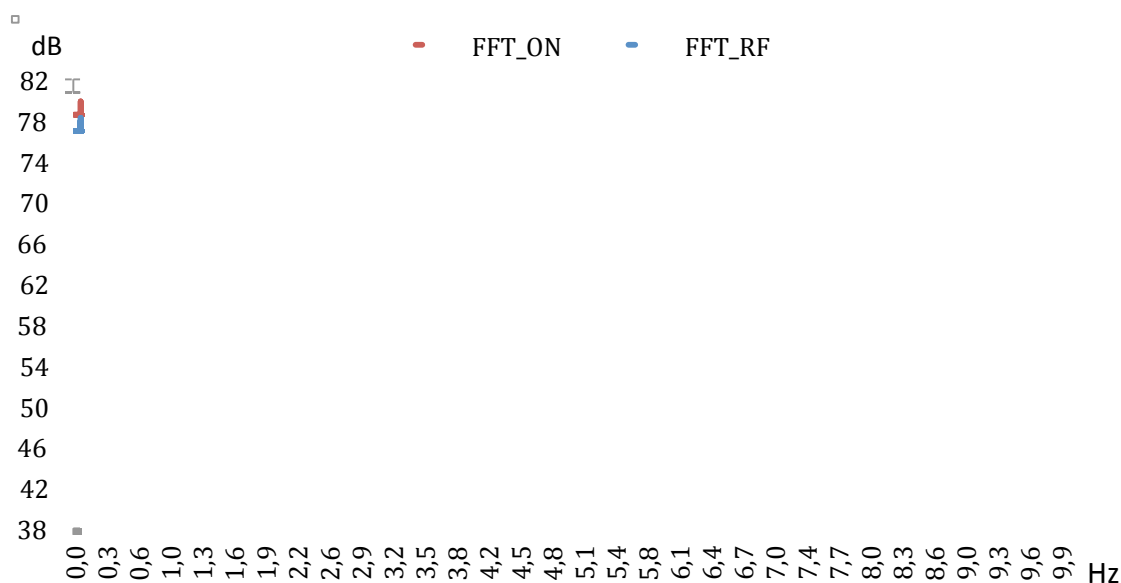


Figura 6.1.18: Comparación FFTs de ruido de fondo y aerogenerador.

Además de las anteriores mediciones de ruido de fondo y ruido de máquina, se realizó una tercera con todos los molinos del parque en funcionamiento. La figura 6.1.19 muestra su FFT donde se pueden apreciar tres frecuencias fundamentales y sus armónicos, esto quiere decir que en el conjunto del parque las turbinas giraban a tres frecuencias diferentes. Dos de estas frecuencias corresponden a las anteriores, según se muestra en la figura 6.1.20, la tercera es ligeramente mayor a las anteriores. El primer armónico de esta última frecuencia se encuentra a 2.01 Hz, mientras que el segundo aparece a 3.02, de lo que resulta una frecuencia fundamental de 1.01 Hz.

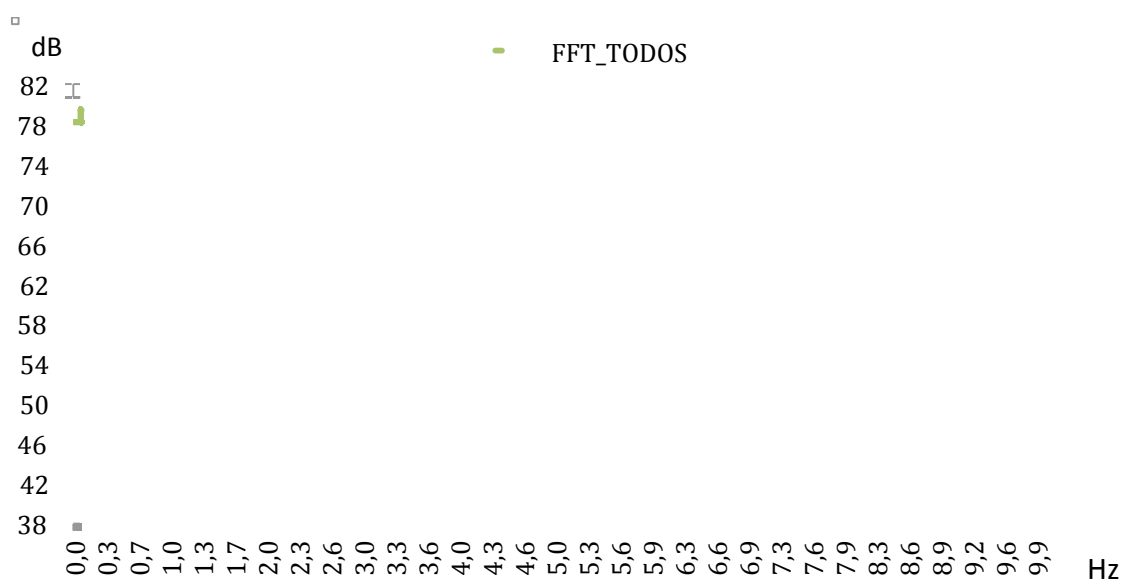


Figura 6.1.19: FFT del ruido del conjunto del parque Moncayuelo.

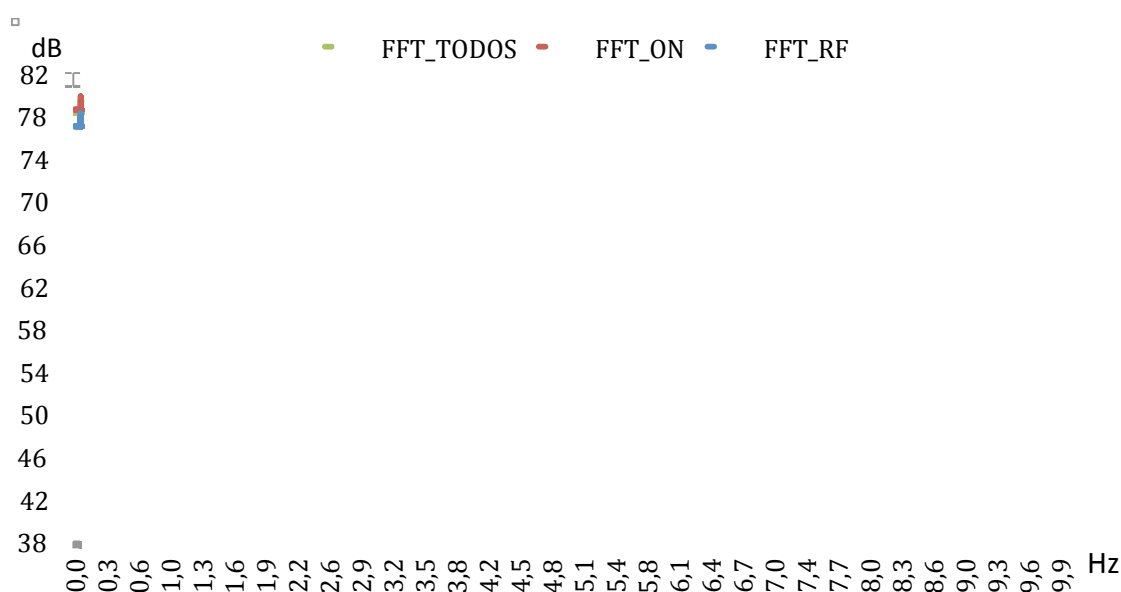


Figura 6.1.20: Comparación de las tres FFTs.

Del conjunto de todas estas gráficas podemos sacar varias conclusiones. La primera es que la mayoría de los aerogeneradores giraban a la frecuencia correspondiente al ruido de fondo, ya que el nivel que muestra es bastante alto comparándolo con el nivel del aerogenerador objeto de estudio que se encontraba mucho más cerca del punto de recepción. La segunda es que la máquina analizada giraba a la frecuencia de 0.91 Hz. La tercera es que había unas pocas máquinas que giraban a la frecuencia más grande ya que su nivel es menor que los de la primera y segunda frecuencia. La última conclusión tiene que ver con el nivel sonoro, ya que como se puede apreciar claramente en la figura 6.1.20 y en la tabla 6.1.1, la amplitud de los armónicos aumenta cuando varios aerogeneradores entran en fase.

Armónico	1°	1°	1°	2°	2°	2°
F (Hz)	1,67	1,83	2,01	2,51	2,74	3,02
RF (dB)	61,9	-	-	63,1	-	-
ON (dB)	64	67,2	-	65,3	67	-
TODOS (dB)	65,6	66,16	62,79	70,75	67,01	62,66

Tabla 6.1.1: Resumen amplitud de los armónicos.

Para el caso del aerogenerador tipo AW109/3000, la frecuencia de paso de pala no es tan distinguible como en el caso anterior ya que los niveles sonoros de ruido de fondo son para todo el conjunto de medidas muy superiores en el parque Peñablanca que en el parque Moncayuelo. Además se une el hecho de que en el parque Peñablanca todas las máquinas son del tipo AW77/1500 excepto una.

Aún así se puede apreciar en la figura 6.1.21 un ligero incremento de nivel a las frecuencias de 1.31 Hz y 1.97 Hz, lo que lleva a pensar que la frecuencia fundamental era de 0.66 Hz, lo cual resulta lógico teniendo en cuenta que las dimensiones de este aerogenerador son mayores que las del AW77/1500.

Si observamos ahora, en la figura 6.1.22, la FFT correspondiente al ruido de fondo, se puede apreciar los armónicos generados por los aerogeneradores más pequeños. El primero visible se muestra a la frecuencia de 3.08 Hz y el segundo a 4.51 Hz, de lo que resulta una frecuencia fundamental de 1.43 Hz.

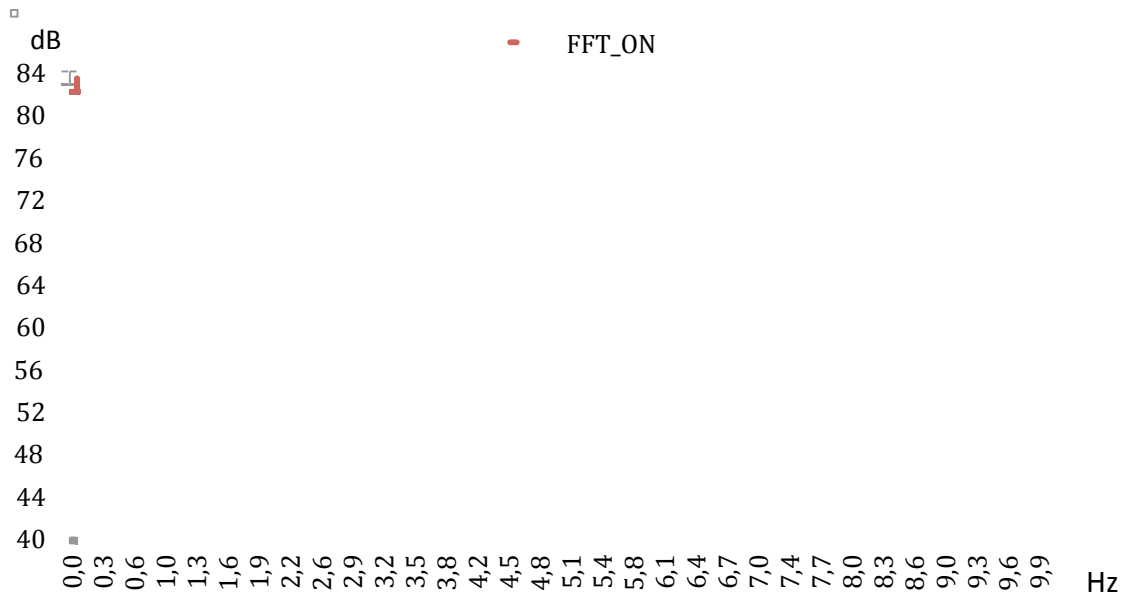


Figura 6.1.21: FFT del ruido del aerogenerador tipo AW109/3000.

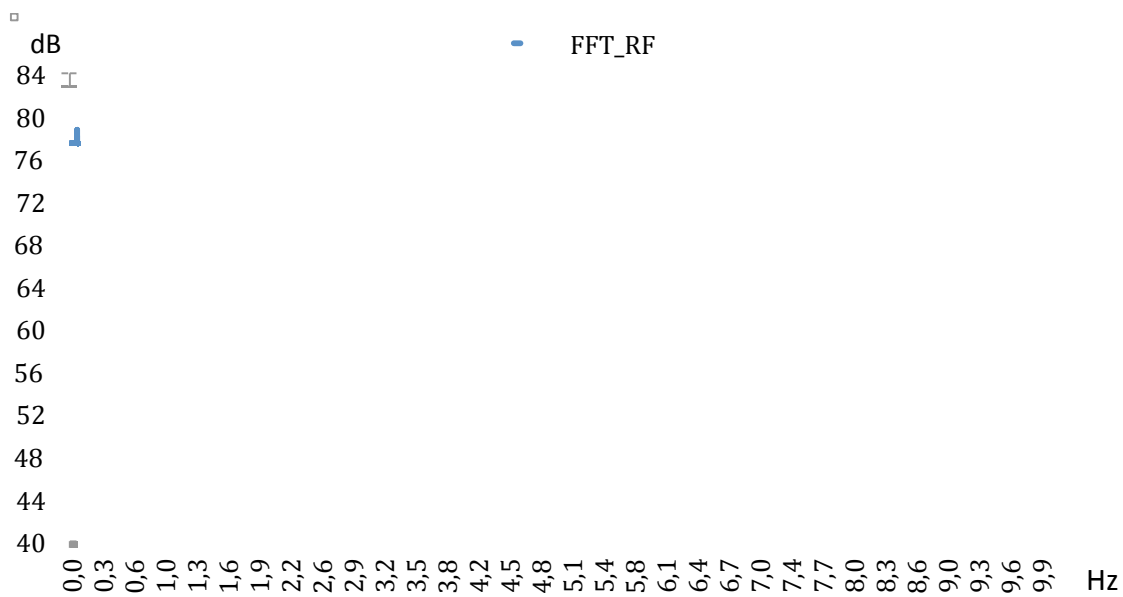


Figura 6.1.22: FFT del ruido del aerogenerador tipo AW109/3000.

Si comparamos ahora las dos gráficas, mediante la figura 6.1.23, podemos observar las dos frecuencias de paso de pala.

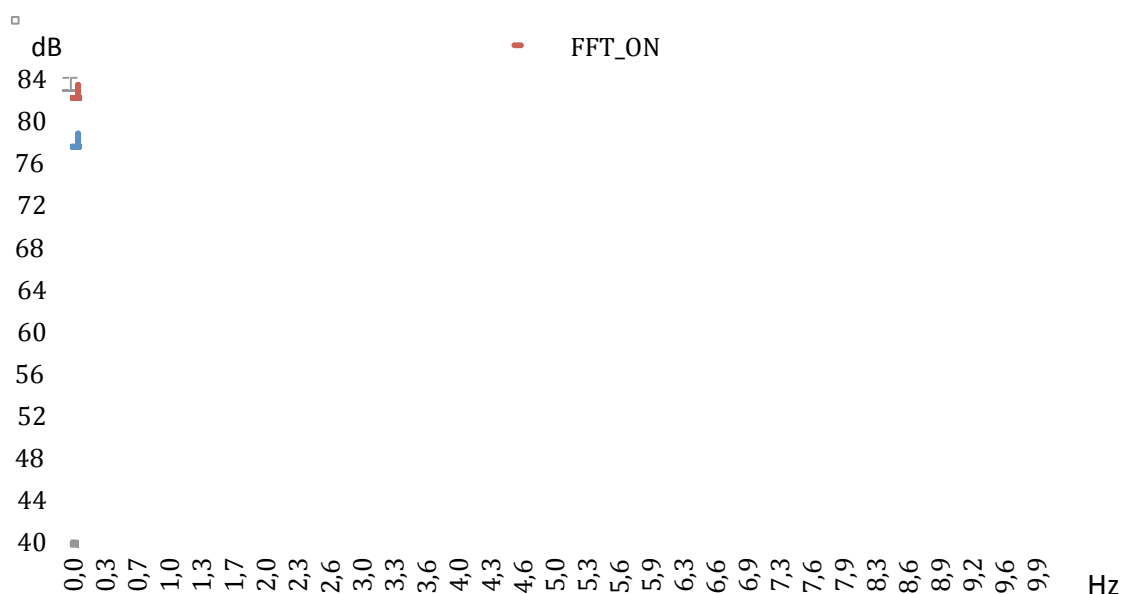


Figura 6.1.23: Comparación de las FFTs.

6.1.4 Percepción de infrasonidos y ruido de baja frecuencia

Llegados a este punto del análisis, es necesario realizar una evaluación de los niveles sonoros obtenidos y compararlos con los mencionados en el apartado 2. Para ello, en primer lugar, hemos representado nuevamente el espectro, con la diferencia de que ahora se representa en dB lineales. Para este ejemplo hemos escogido los niveles sonoros correspondientes a las velocidades máximas ya representadas en el apartado 6.1.2 para el caso de las medidas realizadas el 12 de agosto y el promedio de las medidas realizadas el 28 de septiembre y 7 de octubre, según se muestra en la figura 6.1.24.

Como se puede observar en la gráfica los mayores niveles, se obtienen a frecuencias infrasónicas, entre 0,8 y 20 Hz. Comparando estos niveles con los umbrales de audición mencionados en el apartado 2.1.1, observamos que los niveles sonoros obtenidos están muy por debajo de estos umbrales. Por ejemplo, el umbral a 4 Hz es de 107 dB, mientras que el valor máximo obtenido es de 80,2 dB, el umbral a 10 Hz es de 97 dB, mientras que el valor máximo obtenido es de 73,3 dB, finalmente el umbral a 20 Hz es de 79 dB, mientras que el valor máximo obtenido es de 68,2 dB.

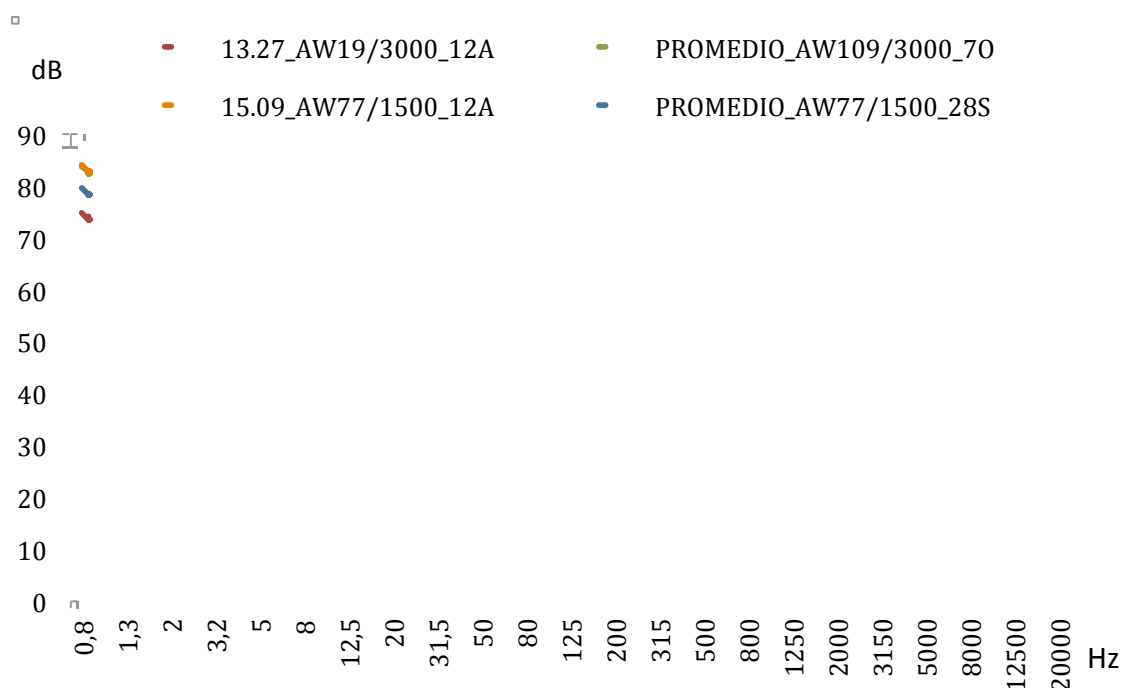


Figura 6.1.24: Comparación de las FFTs.

A la vista de estos resultados, podemos concluir que los niveles de infrasonidos registrados para los aerogeneradores objeto de estudio, no son lo suficientemente elevados como para ser perceptibles por seres humanos y mucho menos que influyan en la molestia.

En segundo lugar hemos creído conveniente plasmar en una tabla los niveles sonoros equivalentes a través tanto de los índices habituales, como de los índices de evaluación indicados en el apartado 2.1.3, como son la ponderación G y la diferencia entre la ponderación C y A. Esto queda reflejado en la tabla 6.1.2 donde hemos utilizado el mismo ejemplo que en el caso anterior.

INDICE	AW77/1500		AW109/3000	
	15,09_12A	PROMEDIO_28S	13,27_12A	PROMEDIO_70
L_{eq}	94,82	92,78	100,00	96,85
L_{Aeq}	55,29	52,20	53,50	53,44
L_{Ceq}	77,89	65,84	65,90	67,78
L_{Geq}	82,37	74,84	74,58	78,46
$L_{Ceq}-L_{Aeq}$	22,60	13,65	12,40	14,34

Tabla 6.1.2: Resumen de índices de evaluación.

Analizando esta tabla se pueden obtener varias conclusiones. En primer lugar los niveles equivalentes, L_{eq} , muestran valores elevados a la distancia de medida, pero no lo suficiente como para causar excesiva molestia. Los niveles equivalentes ponderados A, L_{Aeq} , reflejan niveles que pueden ser equiparables a otras fuentes habituales como el tráfico rodado, por lo que se descarta el aumento de la molestia debida al nivel sonoro producido por los aerogeneradores.

Por otro lado los niveles equivalentes ponderados G, L_{Geq} , son también elevados, pero no superan el umbral propuesto de 85 dBG, lo cual refleja que los infrasonidos forman parte del espectro sonoro generado por los aerogeneradores, pero no suponen un aumento en la molestia ya que no son perceptibles.

Por último, el índice diferencia entre los niveles equivalentes ponderados C y A, muestra diferencias superiores a 10 dB, llegando a ser de más de 15 dB, por lo que podemos asegurar que el ruido general producido por los aerogeneradores está muy influenciado por el ruido de baja frecuencia.

6.1.5 Potencia sonora aparente

Se ha calculado la potencia sonora aparente según la norma E DIN IEC 61400-11 [39]. El nivel de potencia sonora aparente $L_{WA,k}$ se calcula a partir de los niveles de potencia sonora por bandas de 1/3 de octava $L_{WA,i,k}$.

$$L_{WA,k} = 10 \cdot \log \sum 10^{\left(\frac{L_{WA,i,k}}{10}\right)}$$

Los niveles de potencia sonora por bandas de 1/3 de octava, se obtienen a partir del nivel de presión sonora en bandas de 1/3 de octava corregido por ruido de fondo, $L_{V,c,i,k}$, para las velocidades de viento de referencia en la posición de referencia como sigue:

$$L_{WA,i,k} = L_{V,c,i,k} - 6 + 10 \lg \left[\frac{4\pi R_1^2}{S_0} \right] \quad (9)$$

donde

$L_{V,c,i,k}$ es el nivel de presión sonora ponderado A en la banda de tercio de octava i , corregido por ruido de fondo a velocidad de viento de referencia k , y bajo condiciones meteorológicas de referencia;

R_1 es la distancia oblicua en metros desde el centro del rotor al micrófono; y

S_0 es un área de referencia, $S_0 = 1 \text{ m}^2$.

La constante de 6 dB en la ecuación (9) se debe a la duplicación aproximada de la presión que ocurre para medidas de nivel sonoro en la placa colocada en el suelo.

Utilizando este método, todos los niveles de presión sonora medida deben ser corregidos por la influencia del ruido de fondo. Para niveles de presión sonora de fondo promediados que estén 3 dB o más por debajo del nivel del aerogenerador el valor corregido se obtenido utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{V,c,i,k} = 10 \cdot \lg \left[10^{\left(\frac{L_{V,T,i,k}}{10} \right)} - 10^{\left(\frac{L_{V,B,i,k}}{10} \right)} \right] \quad (10)$$

donde

$L_{V,c,i,k}$ es el nivel de presión sonora continua equivalente, en decibelios, asignado al aerogenerador;

$L_{V,T,i,k}$ es el nivel de presión sonora continua equivalente, en decibelios, del aerogenerador más el ruido de fondo; y

$L_{V,B,i,k}$ es el nivel de presión sonora de ruido de fondo continuo equivalente, en decibelios.

Si el nivel de presión sonora continua equivalente del aerogenerador más el ruido de fondo, es menos de 3 dB mayor que el nivel de ruido de fondo, $L_{V,B,i,k}$ se corrige

restando 3 dB.

A continuación se presentan cuatro tablas (tabla 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6) resumen donde se especifican los valores por bandas de tercio de octava y en banda ancha para cada velocidad de referencia.

Los resultados muestran un nivel de potencia de entre 1,5 y 2 dB inferior al facilitado por el fabricante. Recordando que en el parque Peñablanca los niveles de ruido de fondo son siempre muy superiores a los del parque Moncayuelo, es fácil analizar los resultados obtenidos.

En primer lugar para las mediciones sin paravientos obtenemos mayor nivel de potencia para la máquina más pequeña, lo cual puede resultar contradictorio si no tenemos en cuenta que las diferencias entre los niveles sonoros producidos por el aerogenerador y ruido de fondo en el parque Peñablanca, en general, no superan los 3 dB, salvo en alguna banda de media frecuencia, mientras que en el parque Moncayuelo encontramos estas diferencias para casi todo el espectro.

Por otro lado en las mediciones realizadas con paravientos obtenemos mayores niveles de potencia para el aerogenerador tipo AW109/3000, ya que se obtienen mayores diferencias de nivel sonoro, comparando ruido de máquina y ruido de fondo, a lo largo del espectro.

12 Agosto - AW77/1500										
	V_{Ref} (m/s)									
	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
F (Hz)	POTENCIA SONORA APARENTE, $L_{\text{WA},i,k}$ (dBA)									
20	58,1	61,7	59,4	62,4	62,2	61,4	63,3	64,1	68,0	63,6
25	62,4	65,7	63,9	66,3	65,3	65,0	67,7	67,2	72,2	67,7
31,5	65,7	68,8	67,2	70,0	68,9	68,4	70,6	70,5	74,7	70,4
40	68,7	71,3	69,6	72,0	71,0	70,7	73,0	72,4	77,1	72,8
50	72,1	73,5	72,9	74,8	73,1	73,5	75,6	74,6	79,2	74,5
63	76,1	76,2	78,0	77,8	75,4	76,3	77,7	75,9	80,0	76,8
80	79,2	78,5	81,3	79,8	76,6	78,5	78,9	77,5	80,6	78,0
100	82,4	81,4	83,5	82,2	79,3	81,2	81,0	79,9	81,6	81,1
125	85,7	85,2	86,6	85,3	83,0	84,6	83,9	83,6	84,7	84,8
160	88,9	87,6	90,3	88,0	86,1	87,7	86,6	86,4	87,6	87,8
200	91,6	89,9	92,6	90,3	88,8	90,3	88,9	88,7	90,4	90,7
250	94,0	92,5	94,6	92,6	91,4	92,7	91,4	91,2	92,5	93,0
315	94,9	93,5	95,3	93,8	92,8	93,8	92,9	92,4	93,9	94,2
400	93,6	92,4	93,5	92,7	92,2	92,8	91,9	92,0	92,8	93,0
500	92,1	91,3	91,8	91,6	91,5	92,1	91,1	91,2	92,0	92,1
630	93,2	92,8	92,8	93,0	93,4	93,8	92,8	93,0	93,6	93,6
800	90,9	90,8	90,5	91,0	91,7	92,0	91,0	91,3	91,9	91,7
1000	90,3	90,4	89,9	90,5	91,3	91,3	90,7	91,0	91,3	91,0
1250	93,1	92,3	93,2	92,9	93,8	93,9	92,3	93,0	93,9	93,8
1600	87,9	88,1	87,8	88,1	88,9	88,9	88,3	88,6	88,5	88,4
2000	85,0	85,0	84,9	85,0	86,2	85,9	85,6	86,1	85,8	85,7
2500	82,8	82,7	83,0	82,7	84,0	83,6	83,3	83,9	83,4	83,4
3150	79,7	79,2	80,4	79,2	80,4	80,5	79,5	80,3	80,2	80,5
4000	75,8	75,6	76,3	75,6	76,2	76,6	75,6	77,0	75,9	76,2
5000	72,9	73,0	73,1	72,6	73,6	73,8	73,2	75,0	73,7	73,8
6300	71,7	72,1	71,2	71,6	73,0	72,9	72,6	74,5	73,6	73,1
8000	71,5	72,1	70,9	71,6	73,0	72,7	72,8	74,4	74,2	73,2
10000	70,9	71,9	70,4	71,6	72,8	72,4	73,0	74,1	74,9	73,2
$L_{\text{AW},k}$ (dBA)	103,0	102,2	103,3	102,5	102,3	102,9	101,9	102,0	102,9	102,9

Tabla 6.3: Potencia sonora aparente. Aerogenerador AW77/1500. 12 Agosto.

28 Septiembre - AW77/1500							
	V_{Ref} (m/s)						
	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
F (Hz)	POTENCIA SONORA APARENTE, $L_{WA,i,k}$ (dBA)						
20	57,0	55,6	57,6	55,7	55,9	57,5	56,0
25	60,1	60,3	61,7	59,7	60,5	61,6	60,6
31,5	63,6	64,0	65,3	63,2	64,1	64,6	63,7
40	67,6	67,9	68,4	67,9	68,0	68,3	67,8
50	69,5	70,3	70,8	69,9	70,5	71,2	70,2
63	74,0	75,0	75,0	74,4	74,6	74,8	74,0
80	78,1	78,7	78,6	79,1	78,4	78,6	78,2
100	81,4	82,1	81,8	82,2	81,6	81,8	81,6
125	85,4	86,1	85,8	86,2	85,5	85,5	85,7
160	89,1	89,7	89,3	89,7	89,1	89,2	89,3
200	92,8	93,0	92,7	93,0	92,4	92,7	92,7
250	92,6	92,8	92,6	93,0	92,4	92,4	92,5
315	93,5	93,9	93,9	94,0	93,6	93,6	93,6
400	92,4	92,8	92,8	92,8	92,7	92,7	92,6
500	91,5	91,7	91,8	91,9	91,8	91,6	91,6
630	92,8	93,1	93,3	93,3	93,5	93,1	93,1
800	90,8	91,2	91,5	91,3	91,7	91,3	91,2
1000	90,2	90,8	91,0	90,8	91,3	90,8	90,6
1250	92,6	93,2	93,2	93,7	93,7	93,0	93,2
1600	87,7	88,4	88,4	88,5	88,9	88,3	88,3
2000	84,8	85,7	85,6	85,5	86,0	85,5	85,5
2500	82,8	83,5	83,3	83,4	83,6	83,2	83,3
3150	79,5	80,1	80,0	80,3	80,3	79,7	80,1
4000	74,7	77,0	76,1	75,8	77,2	75,8	76,0
5000	72,3	74,0	73,5	73,3	74,6	73,3	73,3
6300	71,7	73,2	72,8	72,3	73,5	72,5	72,5
8000	72,0	73,1	72,7	72,4	73,3	72,6	72,5
10000	72,1	72,8	72,5	72,3	73,0	72,5	72,4
$L_{AW,k}$ (dBA)	102,5	102,9	102,9	103,1	102,9	102,7	102,7

Tabla 6.4: Potencia sonora aparente. Aerogenerador AW77/1500. 28 Septiembre.

12 Agosto - AW109/3000											
	V_{Ref} (m/s)										
	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13
F (Hz)	POTENCIA SONORA APARENTE, $L_{WA,i,k}$ (dBA)										
20	59,0	58,4	54,7	54,4	54,9	55,5	55,4	55,8	56,0	55,6	58,1
25	61,2	62,1	59,0	59,0	59,5	60,0	59,8	60,4	60,8	60,7	62,7
31,5	65,5	67,6	63,4	63,9	64,0	65,0	64,5	65,2	64,7	65,2	67,6
40	70,2	71,8	68,0	68,1	68,4	69,2	69,2	69,3	69,0	70,4	72,5
50	73,3	75,0	72,4	72,6	72,6	73,3	73,2	73,5	74,0	75,0	76,0
63	75,9	77,6	74,9	75,1	75,1	75,7	75,6	75,7	76,7	77,2	77,2
80	76,9	79,7	75,9	77,1	76,6	77,7	77,3	77,2	76,9	79,4	79,3
100	80,7	83,2	79,6	80,6	80,4	81,5	81,1	81,2	82,3	84,1	83,3
125	82,8	84,8	81,7	82,7	82,4	83,2	82,9	82,9	84,3	83,9	83,7
160	84,2	86,4	83,0	84,3	83,9	84,9	84,6	84,4	84,6	85,5	85,9
200	86,7	88,8	85,4	87,1	86,6	87,9	87,2	87,1	87,1	89,0	89,0
250	90,1	91,4	88,5	90,0	89,8	90,9	90,3	90,2	90,5	91,6	91,8
315	90,3	92,3	89,3	91,1	90,4	91,4	91,0	90,6	90,8	91,5	92,3
400	90,2	92,9	89,4	91,1	90,3	91,3	91,1	90,5	91,3	91,1	92,1
500	91,5	94,0	90,9	92,1	91,9	92,5	92,4	91,8	92,2	92,3	93,4
630	92,6	95,2	92,5	92,9	93,0	93,2	93,4	92,6	92,7	92,8	93,6
800	91,6	94,7	91,5	92,4	92,1	92,0	92,5	91,6	92,0	92,1	92,4
1000	90,8	93,8	90,7	91,5	91,2	91,0	91,3	90,9	90,9	90,9	91,2
1250	91,0	94,5	91,3	91,4	91,6	91,3	92,0	90,8	91,3	90,9	91,2
1600	90,3	93,6	90,4	91,0	90,6	90,5	90,8	89,9	90,4	90,2	90,0
2000	88,3	90,6	87,8	89,0	88,3	88,0	88,3	87,7	88,0	88,0	88,2
2500	86,6	89,3	86,3	87,2	86,8	86,5	86,8	86,2	86,6	86,6	86,7
3150	84,3	87,4	83,9	85,2	84,3	84,1	84,4	84,0	84,5	84,0	84,4
4000	81,2	85,2	80,7	82,6	81,1	80,9	81,2	80,7	81,7	80,5	81,6
5000	78,2	83,2	77,4	79,7	77,9	77,7	78,1	77,7	78,9	76,9	78,9
6300	75,3	81,1	73,9	76,8	75,0	74,9	75,5	75,1	76,3	73,6	76,7
8000	73,2	79,1	71,2	74,6	72,6	72,8	73,6	73,3	74,1	71,2	74,8
10000	71,7	76,7	69,2	72,8	70,9	71,1	71,9	71,8	72,3	69,1	73,1
$L_{AW,k}$ (dBA)	101,5	104,3	101,1	102,1	101,8	102,1	102,2	101,5	101,9	102,1	102,6

Tabla 6.5: Potencia sonora aparente. Aerogenerador AW109/3000. 12 Agosto.

7 Octubre - AW109/3000							
	V_{Ref} (m/s)						
	8,0	8,5	9,5	10,0	11,0	11,5	12,5
F (Hz)	POTENCIA SONORA APARENTE, $L_{WA,i,k}$ (dBA)						
20	61,7	62,8	61,7	63,9	62,5	60,9	59,2
25	64,0	65,7	64,4	66,5	65,5	63,0	62,4
31,5	68,3	68,9	68,1	69,8	69,0	67,0	66,4
40	73,6	73,2	73,3	73,7	73,6	73,3	72,3
50	76,0	75,8	75,5	76,2	76,1	75,1	74,6
63	78,4	78,7	78,3	79,1	78,8	77,7	77,3
80	82,2	82,1	82,1	82,2	82,2	81,6	81,2
100	84,1	84,0	83,9	84,1	84,1	83,0	83,1
125	85,8	85,9	85,6	86,0	85,7	84,6	85,1
160	88,7	88,8	88,9	89,0	88,7	88,3	88,1
200	94,3	94,3	94,4	94,2	94,2	93,7	93,8
250	96,4	96,3	96,5	96,2	96,2	95,9	95,8
315	94,4	94,2	94,5	94,3	94,3	94,0	93,7
400	91,0	91,0	91,1	91,6	91,3	90,6	90,7
500	92,6	92,2	92,2	92,8	92,5	91,9	91,7
630	92,9	93,3	93,1	93,9	93,5	92,6	92,7
800	92,2	92,3	92,1	92,8	92,6	91,8	92,0
1000	92,2	92,2	92,1	92,7	92,5	92,1	92,0
1250	91,3	91,8	91,3	92,3	92,1	90,8	91,5
1600	90,7	91,1	90,4	91,4	91,3	89,6	90,6
2000	88,0	88,3	88,2	89,1	89,0	87,7	88,3
2500	86,6	86,7	86,8	87,5	87,4	86,4	86,8
3150	84,2	84,3	84,5	85,3	85,4	84,0	84,4
4000	79,8	81,1	81,6	83,3	83,7	80,1	81,7
5000	76,6	78,2	78,4	80,4	80,8	77,3	78,5
6300	74,2	75,5	75,7	77,5	77,6	74,7	75,7
8000	72,4	73,3	73,8	75,0	75,0	72,8	73,6
10000	71,0	71,7	71,7	72,8	72,7	71,3	71,8
$L_{AW,k}$ (dBA)	103,8	103,8	103,8	104,2	104,0	103,3	103,4

Tabla 6.6: Potencia sonora aparente. Aerogenerador AW109/3000. 7 Octubre.

6.2 Parámetros psicoacústicos

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, las diferentes características del sonido no están descritas plenamente por el nivel de ruido equivalente y pueden ser de importancia en la molestia y la percepción del ruido. En el ruido procedente de aerogeneradores, hay una serie de parámetros de sonido que puede aumentar la percepción y la molestia, como por ejemplo las modulaciones y la sonoridad, y que pueden ser fácilmente apreciables si las turbinas están situadas en zonas con un nivel bajo de ruido de fondo.

El objetivo de este apartado es analizar los parámetros psicoacústicos, citados ya en apartados anteriores, como son la fuerza de fluctuación y la sonoridad, y comprobar si están relacionados con la molestia y la sensibilidad subjetivas a ruidos procedentes de aerogeneradores.

Como ya se ha comentado el ruido de fondo juega un papel importante en la molestia. Es por esto que únicamente hemos analizado estos parámetros para las mediciones realizadas en Moncayuelo el 28 de Septiembre y en Peñablanca el 7 de Octubre, las cuales presentan los menores niveles de ruido de fondo.

A continuación se presenta la tabla 6.5 que recoge el valor numérico de estos parámetros para ambos tipos de aerogeneradores.

Minuto	AW77/1500		AW109/3000	
	Sonoridad (Sonio)	Fuerza de fluctuación (Vacil)	Sonoridad (Sonio)	Fuerza de fluctuación (Vacil)
1-5	8,47	1,18	9,45	1,07
6-10	8,3	0,939	9,32	1,09
11-15	8,21	0,968	9,13	1,07
16-20	8,33	0,893	9,11	1,03
21-25	8,27	0,91	9,47	1,05
26-30	8,28	0,918	9,01	1,04
30-32	-	-	8,78	1,05
Promedio	8,31	0,968	9,18	1,06
Desv. Típica	0,08	0,098	0,23	0,02

Tabla 6.2.1: Valores psicoacústicos.

Los valores obtenidos de ambos parámetros psicoacústicos, para la máquina tipo AW109/3000, son superiores que en el caso de la máquina tipo AW77/1500. Este hecho es debido principalmente al nivel de presión sonora, al índice de modulación y la frecuencia de paso de pala.

El nivel de presión sonora afecta a los dos parámetros, tal como se refleja en la tabla 6.5, ya que los niveles obtenidos para el aerogenerador tipo AW109/3000 son, en general, superiores a los tipo AW77/1500.

La frecuencia de modulación, además de aumentar o disminuir la fuerza de fluctuación, también puede afectar a la percepción o la sonoridad subjetiva en relación con el nivel de la modulación de amplitud. Este efecto es más notable para las frecuencias de modulación centradas cerca de 4 Hz, Zwicker y Fastl [16]. En la tabla 6.5, donde se puede apreciar un ligero aumento de la fuerza de fluctuación del aerogenerador tipo AW109/3000 con respecto al tipo AW77/1500, ya que la frecuencia de modulación es ligeramente superior. La amplitud de modulación será por tanto mayor en este caso.

En general, se obtienen valores de fuerza de fluctuación muy superiores al establecido como umbral perceptible (0.2 Vaciles) pese a que la frecuencia de modulación de los aerogeneradores es inferior a la designada por Zwicker y Fastl. Por lo tanto, podemos concluir que la fuerza de fluctuación es una característica inherente a los aerogeneradores sometidos a estudio, cuyos niveles pueden producir un aumento significativo en la molestia con respecto a otros ruidos del mismo nivel sonoro.

Los valores de sonoridad obtenidos corresponden con los que cabría esperar de una fuente sonora con espectro típico emitiendo los mismos niveles. De lo que se deduce que la sonoridad no juega un papel importante en la molestia del ruido producido por los aerogeneradores estudiados, además de que es un parámetro que se encuentra muy influenciado por la distancia a la que se ha obtenido.

7. CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

El ruido de aerogeneradores resulta, para los mismos niveles de presión sonora, más molesto que el procedente de otras fuentes de ruido, como el tráfico rodado. Además, la sensación de molestia incrementa más rápidamente conforme aumenta el nivel de exposición. Sus especiales características – sobretodo en lo referente a modulación en amplitud y carácter silbante – provocan que sea perceptible con mayor facilidad.

Con el objeto de medir y caracterizar las emisiones de ruido de aerogeneradores, hemos llevado a cabo las medidas pertinentes para dos máquinas diferentes (AW77/1500 y AW109/3000) siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN-61400-11.

La principal magnitud caracterizada ha sido la *Potencia sonora aparente* [$L_{AW,k}$ (dBA)] de los aerogeneradores. Para cada velocidad, los resultados obtenidos han sido los siguientes:

AW77/1500 (Viento norte)									
Vel (m/s)	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	10	10,5
$L_{AW,k}$ (dBA)	102,5	102,9	102,9	103,1	102,9	102,7	102,7	103,0	102,2
Vel (m/s)	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	
$L_{AW,k}$ (dBA)	103,3	102,5	102,3	102,9	101,9	102,0	102,9	102,9	

A1097/3000 (Viento norte)									
Vel (m/s)	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5
$L_{AW,k}$ (dBA)	101,5	104,3	101,1	102,1	101,8	102,1	102,2	101,5	101,9

A1097/3000 (Viento sur)							
Vel (m/s)	8,0	8,5	9,5	10,0	11,0	11,5	12,5
$L_{AW,k}$ (dBA)	103,8	103,8	103,8	104,2	104,0	103,3	103,4

Las turbinas eólicas producen infrasonidos, aunque no se ha demostrado que sean un factor importante que contribuya a la molestia. Los niveles de infrasonido obtenidos para los aerogeneradores sometidos a estudio se encuentran por debajo del umbral de audición,

incluso a distancias cortas. Sin embargo, no puede descartarse que individuos con mayor sensibilidad perciban la presencia de este tipo de ondas.

Por medio de un micrófono con rango frecuencial ampliado y análisis FFT de alta resolución se ha detectado la presencia de infrasonidos en la frecuencia de paso de pala y sus armónicos. Los resultados obtenidos para el índice L_{Geq} han sido los siguientes:

Infrasonidos	AW77/1500	AW109/3000
L_{Geq} (dBG)	74,8	78,5

Los resultados espectrales del ruido producido por los aerogeneradores muestran que, en general, se trata de un ruido en el que predominan las bajas y medias frecuencias, resultando un sonido en el que fundamentalmente predominan frecuencias graves.

En cuanto al ruido de baja frecuencia, aunque sus niveles suelen ser bajos, puede ser audible. Existen considerables diferencias individuales en lo relativo a la sensibilidad a variaciones de nivel en este rango frecuencial que pueden provocar un incremento notable de la molestia percibida. Los resultados obtenidos para el índice $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ son los siguientes:

Ruido de Baja Frecuencia	AW77/1500	AW109/3000
$L_{Ceq} - L_{Aeq}$ (dB)	13,6	14,3

En los dos parques estudiados, los aerogeneradores están diseñados para funcionar con el rotor orientado a barlovento, de tal forma que se minimizan los ruidos de baja frecuencia, evitando la interacción que se produce entre las palas y la torre.

El ruido aerodinámico es el componente predominante de los aerogeneradores modernos. Su carácter silbante surge como resultado del desplazamiento del aire por la pala y de las turbulencias en su superficie, incrementándose proporcionalmente a la velocidad de punta de pala. La modulación de amplitud está producida por la turbulencia añadida a la frecuencia de paso de pala por la torre. El efecto puede acentuarse bajo determinadas condiciones atmosféricas (atmósfera estable, velocidad y dirección del viento...).

En relación a lo anterior, se ha realizado un análisis psicoacústico del ruido procedente de los aerogeneradores. Los resultados obtenidos para la sonoridad y la fuerza de fluctuación son los siguientes:

Análisis psicoacústico	AW77/1500	AW109/3000
Sonoridad (S)	8,3	9,2
Fuerza de fluctuación (V)	0,97	1,06

Por un lado, se concluye que la sonoridad no juega un papel importante en la molestia del ruido producido por los aerogeneradores estudiados. Para la fuerza de fluctuación se han obtenido valores, relacionados con la modulación en amplitud característica del ruido de aerogeneradores, superiores al establecido como umbral de molestia perceptible. Estos valores podrían provocar un aumento significativo en la molestia con respecto a otros ruidos constantes del mismo nivel sonoro.

Como conclusión general podemos decir que la principal consecuencia ante la presencia de niveles altos de ruido procedente de aerogeneradores es la dificultad para conciliar el sueño y su déficit de salud asociado. Existen factores no audibles que pueden potenciar los efectos adversos: impacto visual, no beneficiarse económicamente, movimiento constante de palas, expectativas en las condiciones de vida en zonas rurales, sensación de intrusión y falta de control... Estos factores refuerzan la actitud negativa ante el impacto de los parques eólicos.

8. BIBLIOGRAFÍA

8. BIBLIOGRAFÍA

8.1 Referencias

- [1] H. Moller, C.S. Pedersen, Hearing at Low and Infrasonic Frequencies, *Noise & Health* 6(23), 37-57, 2004.
- [2] B. Berglund, P. Hassmen, R.F. Soames Job, Sources and Effects of Low-Frequency Noise, *J. Acoust. Soc. Am.* 99(5), 2985-3002, 1996.
- [3] ISO 226-2003 Acoustics – Normal Equal-Loudness-Level Contours, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.
- [4] T. Watanabe, H. Moller, Low Frequency Hearing Thresholds in Pressure Field and in Free-Field. *J. Low Freq. Noise Vib.* 9(3), 106-115, 1990.
- [5] Y. Matsumoto. An investigation of the Perception thresholds of Band-Limited Low Frequency Noises: Influence of Bandwidth.
- [6] H.E. von Gierke, C. Nixon, Effects of Intense Infrasound on Man, *Infrasound and Low Frequency Vibration*, W. Tempest, Ed. Academic, London, 1976.
- [7] H.G. Leventhall, Low Frequency Noise and Annoyance, *Noise & Health* 6(23), 59-72, 2004.
- [8] M. Schust, Effects of Low Frequency Noise up to 100 Hz, *Noise & Health* 6(23), 73-85, 2004.
- [9] C.Y.H. Quibai, H. Shi, An Investigation on the Physiological and Psychological Effects of Infrasound on Persons. *J. Low Freq. Noise, Vib. Active Control* 23(1), 71-76, 2004.
- [10] Health Effects of Exposure to Ultrasound and Infrasound. Report of the Independent Advisory Group on Non-ionising Radiation. Documents of the Health Protection Agency, 2010.
- [11] K. Persson, Effects of Low Frequency Noise on Sleep, *Noise & Health* 6(23), 87-91, 2004.
- [12] N. Broner, The Effects of Low Frequency Noise on People – A review, *J. Sound Vib.* 58(4), 483-500, 1976.
- [13] H.G. Leventhall, P. Pelmear, S. Benton, A Review of Published Research on Low Frequency Noise and Its Effects, Dept of Environment, Food and Rural Affairs, London, 2003.
- [14] UNE-EN-61400-11 Aerogeneradores, Técnicas de medida de ruido acústico, 2004.
- [15] ISO 7196:1995 Acoustics -- Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995.
- [16] E. Zwicker, H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer, 1999.

- [17] Project WINDFARMperception. Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents. FP6-2005-Science-and-Society-20. Specific Support Action, Project no. 044628, 2008.
- [18] Landscape Guidelines: Guidelines for Landscape and Visual Impact Assessment, Landscape Institute and Institute of Environmental Assessment, SPON Press, London and New York, 1995.
- [19] N. Pierpont, Wind Turbine Syndrome. A report on a natural experiment, 2006.
- [20] G. Leventhall, How the "mythology" of infrasound and low frequency noise related to wind turbines might have developed. First International Meeting on Wind Turbine Noise: Perspectives for Control. Berlin, 2005.
- [21] E. Pedersen, K.P. Waye Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose–response relationship, *J. Acoust. Soc. Am.* 116 (6), 3460-70, 2004.
- [22] K. Persson, E. Öhrström, Psychoacoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise. *Journal of Sound and Vibration* 250, 65-73, 2002.
- [23] M.V. Lowson, Aerodynamic noise of wind turbines, in *Proceedings of Internoise*, Liverpool, England, pp. 479–484, 1996.
- [24] S. Wagner, R. Bareiss, G. Guidati, G. Wind turbine noise, Springer, 1996.
- [25] Van den Berg, 2004. Do wind turbines produce significant low frequency sound levels? 11th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control, Maastricht, Netherlands, 2004.
- [26] Betke, K., Remmers, H.: “Messung und Bewertung von tieffrequentem Schall”. *Proc. DAGA 1998*. (In German).
- [27] J. Jakobsen, Infrasound Emission from Wind Turbines. *J. Low Freq. Noise, Vib. Active Control* 24(3) 145-155, 2005.
- [28] T. Sugimoto, K. Koyama, Y. Kurihara, K. Watanabe. Measurement of Infrasound Generated by Wind Turbine Generator, *SICE Annual Conference*, Japan, 2008.
- [29] Rogers, Anthony L. Wind Turbine Noise, Infrasound and Noise Perception. University of Massachusetts, 18 January 2006.
- [30] Miljøstyrelsen, Information no. 9/1997 from the Danish Environmental Protection Agency. Orientering om lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø. 1997.
- [31] Kryter, Karl D. The Effects of Noise on Man, Second Edition. Florida: Academic Press Inc., 1985.
- [32] Howe, Brian and McCabe, Nick. Environmental Noise Assessment Pubnico Point Wind

Farm, Nova Scotia, August 2006.

[33] Hepburn, Howard G. "Acoustic and Geophysical Measurement of Infrasound from Wind Farm Turbines." Canadian Acoustics 34.2 (June 2006).

[34] Bass, Jeremy, et al. "Low Frequency Noise in Wind Turbines." The British Wind Energy Association.

[35] The Noise Emissions Associated with Wind Farming in Australia. Australian Wind Energy Association, May 2004.

[36] Bellhouse, George. Low Frequency Noise and Infrasound from Wind Turbine Generators. New Zealand: Bel Acoustic Consulting, 30 June 2004.

[37] M. RAND and A. CLARKE 1990 *Wind Engineering* 14, 319-330. The environmental and community impacts of wind energy in the UK.

[38] Van den Berg, G.P. 2006, *The sounds of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone Noise*.

[39] E DIN IEC 61400 (VDE 0127-11), 2009.

8.2 Links

Wikipedia:

<http://www.wikipedia.com>

Página web de la Universidad de Salford:

http://www.acoustics.salford.ac.uk/res/cox/sound_quality/?content=intro

Google Imágenes:

<http://www.google.es/imghp?hl=es&tab=wi>

Science Direct:

<http://www.sciencedirect.com/>

ANEXOS

ANEXO A

CARACTERIZACIÓN DEL PARAVIENTOS SECUNDARIO

El uso del paravientos secundario incrementa la relación señal ruido tanto para las frecuencias más bajas y altas, reduciendo el ruido del viento inducido al micrófono. Si este es utilizado, se debe documentar y corregir su influencia en la respuesta en frecuencia.

Siguiendo la norma E DIN IEC 61400-11, la configuración de medida para el paravientos secundario debe ser similar a la de la medida del ruido de aerogeneradores. Para ello se utilizó un altavoz emitiendo ruido rosa, el micrófono del test se situó en la placa a 6 metros de distancia del altavoz. El altavoz se dispuso a una altura de 4 m.

El paravientos secundario se colocó sobre el micrófono del test y se realizó una medida de dos minutos. A continuación se realizó otra medida de 2 minutos sin el paravientos. Finalmente se realizó una última medida del ruido de fondo. Todas las mediciones se realizaron por tercios de octava.

Para determinar la influencia del paravientos, se ha obtenido la diferencia entre la medidas con y sin paravientos. Para que la caracterización tenga validez, el ruido de fondo debe ser de al menos 3 dB inferior al nivel registrado con el altavoz en marcha.

A continuación se muestra una tabla con los valores obtenidos y su gráfica correspondiente (figura 6.2.1). La medida es buena excepto para las bandas comprendidas entre 6,3 Hz y 50 Hz y tampoco para las bandas de 12500, 16000 y 20000 Hz. Esto no es de vital importancia ya que, según la norma, la influencia del paravientos se debe calcular a partir de 100 Hz debido a que la pérdida por inserción por debajo de esta frecuencia puede igualarse a 0.

F (Hz)	SIN (dBA)	CON (dBA)	RF (dBA)	CON-RF (dB)	DIFERENCIA SIN-CON (dBA)
20	2,4	2,2	2,9	-0,7	0,1
25	9,1	7,8	8,6	-0,8	1,3
31,5	9,5	9,3	9,7	-0,4	0,2
40	16,8	16,5	16,0	0,5	0,3
50	25,0	25,2	23,4	1,9	-0,2
63	33,1	33,8	25,9	7,9	-0,8
80	36,9	37,6	23,1	14,6	-0,7
100	40,8	41,3	33,5	7,8	-0,5
125	43,6	44,2	30,7	13,5	-0,5
160	51,7	52,6	30,2	22,5	-0,9
200	56,5	58,2	32,2	26,0	-1,7
250	58,2	59,2	34,2	25,0	-0,9
315	54,8	54,0	35,2	18,8	0,8
400	55,3	51,6	38,0	13,6	3,7
500	57,9	51,8	40,5	11,3	6,1
630	62,5	55,1	41,4	13,7	7,4
800	64,8	56,6	44,8	11,9	8,2
1000	58,1	54,4	39,8	14,6	3,7
1250	60,2	55,0	34,8	20,1	5,3
1600	63,2	56,8	34,3	22,5	6,5
2000	62,1	55,1	31,6	23,6	7,0
2500	61,7	53,5	30,3	23,2	8,2
3150	57,9	47,2	28,4	18,8	10,7
4000	54,4	43,3	26,9	16,4	11,1
5000	54,7	39,0	25,8	13,2	15,7
6300	52,8	35,3	25,0	10,3	17,5
8000	55,2	31,3	24,4	6,9	23,8
10000	50,5	26,9	23,4	3,5	23,7

Tabla 9.1: Influencia del paravientos frente a ruido rosa en laboratorio.



Figura 9.1: Influencia del paravientos frente a ruido rosa.

Como se puede observar en la gráfica esta corrección no es válida ya que refleja demasiada diferencia de nivel entre las medidas con y sin paravientos, lo cual dista mucho de las diferencias obtenidas durante la medida. Esto puede ser debido a que no se ha tenido en cuenta la influencia del viento sobre el paravientos y sobre el ruido que genera el aerogenerador. Esto quiere decir que en campo abierto el paravientos atenúa tanto el ruido procedente del aerogenerador como el ruido inducido por el viento, mientras que en laboratorio el paravientos únicamente actúa sobre el ruido rosa sin tener en cuenta la influencia del viento.

Además, los niveles que recomienda la norma se alejan mucho de los obtenidos en laboratorio. Por estas razones, hemos creído conveniente no utilizar esta corrección en los cálculos ya que desvirtuaría los resultados.

Por otro lado, tenemos la gran ventaja de tener medidas tanto con paravientos como sin él, por lo que hemos decidido realizar la corrección del paravientos a partir de las mediciones en campo. De esta manera aseguramos resultados coherentes. Esta corrección se puede observar en la tabla 9.2, donde se representan las correcciones para los diferentes días de medida y la corrección recomendada por la norma.

	AW77/1500	AW109/3000	NORMA
F (Hz)	DIFERENCIA SIN-CON (dB)	DIFERENCIA SIN-CON (dB)	Norma (dB)
20	0,0	0,0	0,1
25	0,0	0,0	0,2
31,5	0,0	0,0	0,1
40	0,0	0,0	0,1
50	0,0	0,0	0,1
63	0,0	0,0	0
80	0,0	0,0	0,2
100	0,0	0,0	0,2
125	0,0	0,0	0,1
160	0,0	0,0	-0,1
200	0,0	0,0	-0,3
250	0,2	0,0	0
315	6,0	0,0	0,3
400	6,5	0,3	0,6
500	3,6	2,2	1,2
630	3,3	2,7	1,7
800	4,3	1,4	1,7
1000	4,8	0,0	0,7
1250	6,1	2,4	1,3
1600	6,0	2,2	1,7
2000	5,4	2,4	1,6
2500	2,9	0,8	2,3
3150	1,0	1,3	2,6
4000	4,9	5,1	2,1
5000	4,7	4,9	0,8
6300	4,9	3,0	-0,1
8000	5,7	1,5	0,7
10000	6,3	0,6	1,6

Tabla 9.2: Influencia del paravientos extraída de las mediciones de campo.